



Bachelorarbeit des Studiengangs

Augenoptik/Augenoptik und Hörakustik

**Prof. Dr. Rainer Börret**

Raphaela Streit

## **Deflektometrie**



Bachelorarbeit des Studiengangs  
Augenoptik/Augenoptik und Hörakustik

**Prof. Dr. Rainer Börret**

Zweitprüfer: Prof. Dr. Ulrike Paffrath

# **Deflektometrie**

Zugelassene Abschlussarbeit des Studiengangs Augenoptik/Augenoptik und Hörakustik  
zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

vorgelegt von  
Raphaela Streit

Tag der Einreichung:

14.08.2015

Fakultät Augenoptik und Hörakustik  
Hochschule Aalen

## **Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorthesis selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine andere als die angegebene Literatur benutzt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## **Danksagung**

An dieser Stelle der Bachelorarbeit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dominik Wiedemann. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Schöllkopf und Viktor Grün.

Dank Herrn Prof. Dr. Börret und Frau Prof Dr. Paffrath kam diese Arbeit überhaupt erst zustande. Vielen Dank dafür!

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung</b>	<b>II</b>
<b>Danksagung</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>VI</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Motivation</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Ziele der Arbeit</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Material und Methoden: ALI 201</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Material und Methoden: Anleitung Deflektometer</b>	<b>5</b>
<b>1.4.1 Positionierung Messobjekt</b>	<b>5</b>
<b>1.4.2 Starten der Anwendung</b>	<b>7</b>
<b>1.4.3 LED-Tunnel App</b>	<b>8</b>
<b>a) Samples</b>	<b>9</b>
<b>b) Perioden</b>	<b>9</b>
<b>c) Breite</b>	<b>9</b>
<b>d) Winkel</b>	<b>10</b>
<b>e) Phase</b>	<b>10</b>
<b>f) Hi/Lo Gamma</b>	<b>10</b>
<b>g) Weitere Funktionen</b>	<b>11</b>
<b>1.4.4 Beispiele Streifenmuster</b>	<b>11</b>
<b>1.4.5 Vid-App</b>	<b>19</b>
<b>a) Live Aufnahme</b>	<b>19</b>
<b>b) Hammer Tool</b>	<b>19</b>
<b>1.4.6 Surf-Inspect Viewer</b>	<b>20</b>

---

a) Auswahl Pfad	20
b) Kamera	20
c) Bedeutung Bild-Abkürzungen	21
d) Parameter-Fenster	22
e) weitere Funktionen	22
1.4.7 Durchführung einer Messung	23
2 Stand der Forschung und Technik	24
2.1 Interferometrie	24
2.2 Deflektometrie	25
3 Ergebnisse	27
3.1 Geeignete Oberflächen	27
3.1.1 Versuchsbeschreibung	27
3.1.2 Messungen mit dem ALI 201	27
3.1.3 Messungen mit dem Deflektometer mit LED-Tunnel	34
3.2 Wiederholbarkeit	49
3.2.1 Metallsphäre mit Delle	50
3.2.2 Metall mit Polierspur	55
4 Diskussion	60
5 Schlussfolgerung	61
6 Ausblick	62
Literaturverzeichnis	63
Abbildungsverzeichnis	64
Anhang	68

---

## Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
rms	root mean square
MW	Mittelwert
$R^2$	Standardabweichung, Varianz
$\lambda$	Wellenlänge [nm]
He-Ne	Helium-Neon



## Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein, im Zentrum für Optische Technologien neuartiger Aufbau, eingemessen, sowie eine Anleitung für diesen erstellt. Dieser Messaufbau basiert auf Deflektometrie. Es werden Messungen mit diesem Gerät durchgeführt. Für Vergleichsmessungen wird ein Interferometer (ALI 201) verwendet.

Es wird der aktuelle Stand der Technik in der Interferometrie und der Deflektometrie erklärt. Hierbei wird auch auf die allgemeine Funktionsweise beider Messtechniken eingegangen.

Anschließend werden die bei den Versuchsmessungen verwendeten Geräte allgemein erläutert. Das heißt der Aufbau und die Funktion eines Fizeau-Interferometers und eines Phase-Measuring-Deflektometers.

Außerdem wurde eine Bedienungsanleitung für das Deflektometer mit einem LED-Tunnel erstellt, welches ein Entwicklungsgerät von Zeiss ist.

Schließlich werden Flächen mit verschiedenen Oberflächenstrukturen mit den Messgeräten ausgemessen. Die Messwerte mit dem Interferometer sollen als Vergleichswerte dienen, damit man die Messungen am Deflektometer bewerten und einschätzen kann. Es geht vor allem darum, zu sehen, welche Oberflächen mit dem Deflektometer produktiv vermessen werden können. Außerdem soll bei geeigneten Oberflächen die Wiederholbarkeit des Geräts anhand von 20 Wiederholungsmessungen getestet werden.

## **Abstract**

In this bachelor thesis a new experimental set-up at the ZOT (centre for optical technologies) was test measured and an instruction for this was written. This experimental set-up is based on defelctometry. Measurements are taken with this machine. To compare these results there are measurements taken by an interferometer called ALI 201.

The current state of the art of interferometry and deflectometry will be explained. The general functionality of the measuring techniques is also explained. The next step is to illustrate in general the equipment that was used. That means the set-up of an Fizeau-Interferometer and a Phase-Measuring-Deflectometer.

Furthermore there will be description of a detailed instruction manual for the deflectometer with the LED-tunnel (a development of Zeiss). Now different structured surfaces are measured with the machines. The measurements of the interferometer serve as comparative value for rating and ranking the measurements of the deflectometer. Finally we want to see which surfaces can be measured with efficiency by the deflectometer. In addition to that the repeatability of the machine will be tested with suitable surfaces by 20 repetitions of the measurement.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Deflektometrie ist ein relativ neues Messverfahren zur Bestimmung von Oberflächenstrukturen und -veränderungen. Deflektometrie ähnelt der Interferometrie, doch hier kann man Freiformflächen messen, welche stark spiegelnd sind. Für frei geformte Oberflächen benötigt man bei der Interferometrie einen teuren, auf das Objekt angepassten Aufbau. Bei solchen frei geformten und spiegelnden Testobjekten schafft die Deflektometrie Abhilfe. Daher ist es auch aus industrieller Sicht von Bedeutung dieses Messverfahren genauer zu untersuchen. Es können sehr kleine Fehler, zum Beispiel kleine Defekte in einer Glasur von Porzellan, detektiert werden. Außerdem kann ein Testobjekt mit Hilfe der Deflektometrie im dreidimensionalen rekonstruiert werden [1].

Mit dem relativ einfachen Messverfahren kann man beispielsweise Lackteile beim Auto vermessen[2]. Diese Arbeit ist bisher noch mit der Sichtprüfung durchgeführt worden. Da diese Sichtprüfung sehr ermüdend ist und auch nur mit viel Erfahrung durchgeführt werden kann, ist es von großer Bedeutung diese Arbeit durch eine Maschine zu ersetzen. Es ist für das ZOT (Zentrum für Optische Technologien an der HTW Aalen) von Bedeutung ein solches Gerät bereit stellen zu können. Daher ist es auch wichtig dieses Gerät zu verstehen, bedienen zu können und dann auch brauchbare Ergebnisse daraus zu erhalten.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Das Ziel der Arbeit soll sein, dass die verwendeten Geräte (ALI 201 und Deflektometer mit LED-Tunnel) genau erklärt werden. Außerdem soll eine Bedienungsanleitung erstellt werden, damit jeder das Deflektometer mit dem LED-Tunnel verwenden kann.

Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung, welche Art von Oberflächen in Bezug auf die Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit, zum Beispiel polierter Stahl oder poliertes Glas, mit dem Deflektometer gemessen werden können.

Anschließend wird die Wiederholbarkeit des Messgeräts untersucht.

### 1.3 Material und Methoden: ALI 201

Das Messgerät ALI 201 wird in der Abbildung 1 dargestellt:



Abbildung 1: Messgerät ALI 201

Der Hersteller des Gerätes ist Schneider, der Interferometerenteil kommt von ZYGO und lautet GPI XP.

Gerätesbeschreibung ALI 201:

- Berührungsloses Messen → Optisch durch Interferenzen
- Messen von optischen Oberflächen (Plan, Sphäre, Asphäre)
- Genauigkeit von  $\lambda/10 \approx 60 \text{ nm}$
- Die Zygo-Software erstellt ein 3D-Fehlerprofil

Die Gerätbeschreibung gibt Auskunft darüber, was das Messgerät ALI 201 leisten kann.

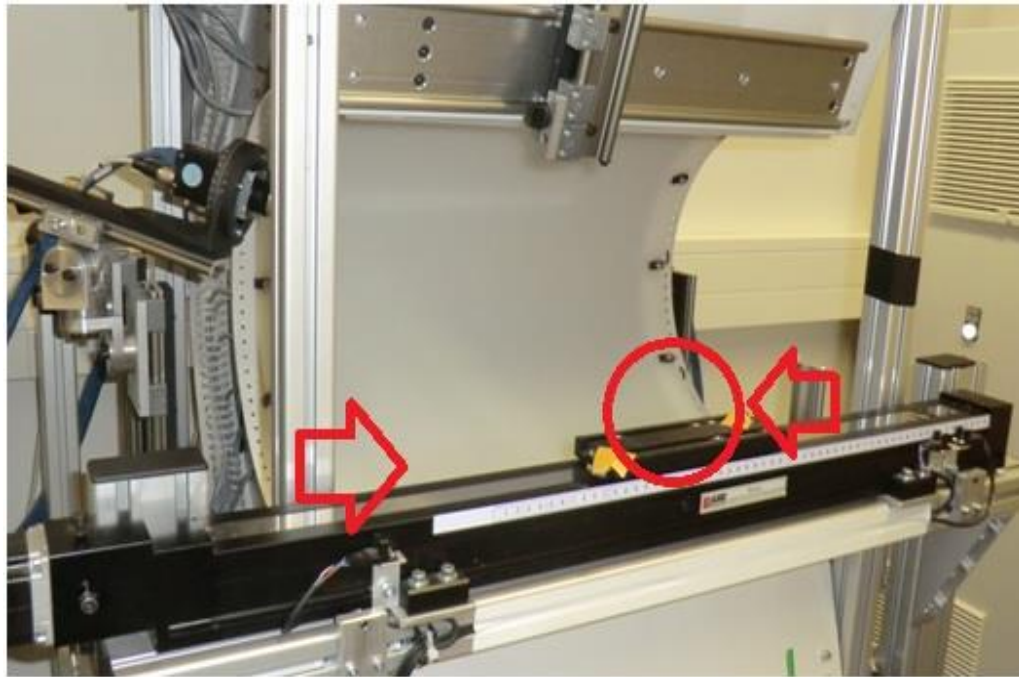
Es misst berührungslos durch Interferenzen. Gemessen werden können: plane, sphärische und asphärische Oberflächen. Hierbei muss jedoch auf die richtige Auswahl der Messlinse geachtet werden. Da in den hier aufgeführten Versuchen (siehe Kapitel 3.1.2) nur plane Flächen vermessen werden, spielt dies eine untergeordnete Rolle. Die laterale Messgenauigkeit ist  $\lambda/10$ , also ungefähr 60 nm, da das Interferometer einen He-Ne-Laser mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von 632 nm hat. Die Leistung des Lasers beträgt 2 Milli Watt. Außerdem beträgt der Durchmesser des Lasers 102 Millimeter. Am Ende der Messung wertet eine Software der Firma Zygo die Daten aus und erstellt ein 3D-Fehlerprofil.

Das Gerät ALI 201 ist ein Fizeau-Interferometer. Der allgemeine Aufbau eines solchen Geräts wird ausführlich in Kapitel 2.1 behandelt. Es wurde bereits erwähnt welche Oberflächen gemessen werden können, dies geschieht mit Hilfe von Reflexion und der Wellenfrontanalyse in Transmission.

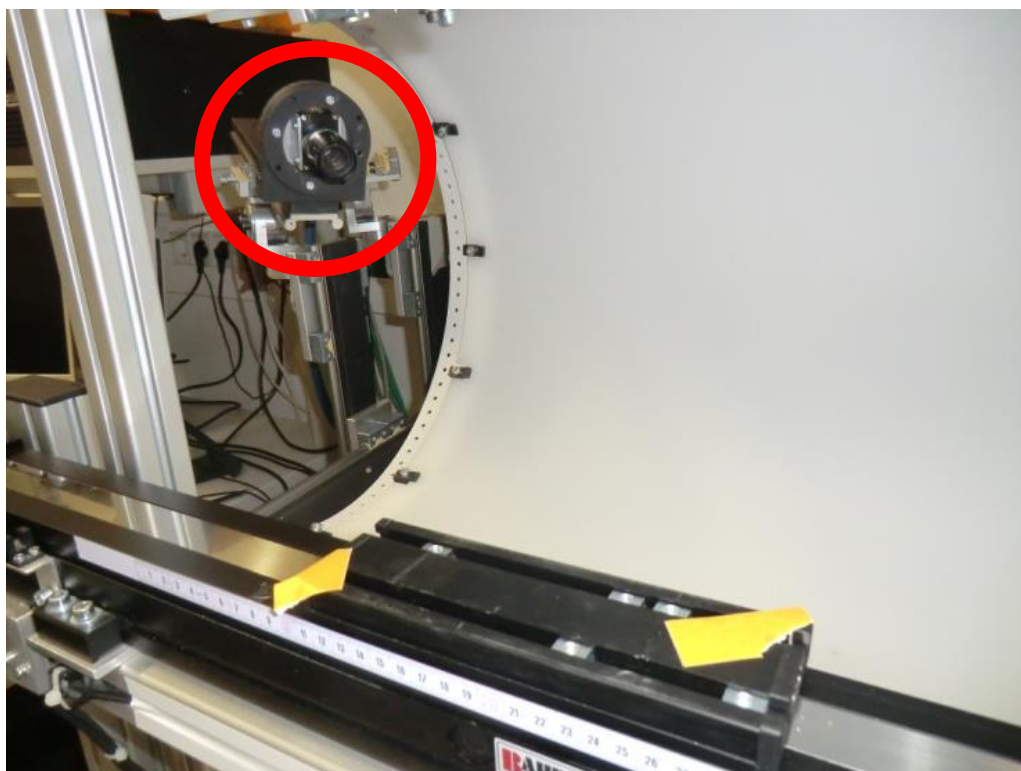
## **1.4 Material und Methoden: Anleitung Deflektometer**

### **1.4.1 Positionierung des Messobjekts**

Das Testobjekt selbst sollte optimalerweise im ersten Viertel, mindestens jedoch bei der Hälfte des LED-Tunnels stehen. Hierdurch ist gewährleistet, dass nahezu der volle LED Halbbildschirm ausgenutzt werden kann. Das Testobjekt sollte also zwischen den beiden roten Pfeilen stehen, die in Abbildung 2 zu sehen sind.



**Abbildung 2: Positionierung des Messobjekts im LED-Tunnel**



**Abbildung 3: Kamerapositionierung**

Die Kamera sollte die Bilder seitlich von hinten aufnehmen (optimal sind etwa 40°). In Abbildung 3 sind die Markierungen auf dem Schiebereiter zu sehen, zwischen welchen man das Messobjekt platziert. In diesem Winkel sollte das Testobjekt zur Kamera (im Bild rot markiert) stehen. Die Kamera muss auf das Testobjekt scharf gestellt werden. Wenn das Testobjekt Glas ist, sollte streifend auf das Objekt geschaut werden.

#### 1.4.2 Starten der Anwendung

Um die Messung am Deflektometer zu starten gibt es drei verschiedene Apps die gestartet werden müssen.



**Abbildung 4: Screenshot vom Desktop - Für die Bedienung notwendigen Anwendungen**

Auf diesem Bild sind die drei Apps zu sehen:

- die LED-Tunnel-Verknüpfung, welche die Bedienung des LED Tunnels sowie dessen Eigenschaften erlaubt
- die VidApp-Verknüpfung, zur Einstellung und Darstellung der angeschlossenen Kameras
- die SurfView-Verknüpfung, zur Auswertung der aufgenommenen Daten

### 1.4.3 LED-Tunnel App

Beim Öffnen der LED-Tunnel-Verknüpfung öffnen sich zwei Fenster. Zum einen ein Fenster, in dem die Einstellungen des LED-Tunnels geregelt werden können und zum anderen ein Bild der projizierten Streifen.

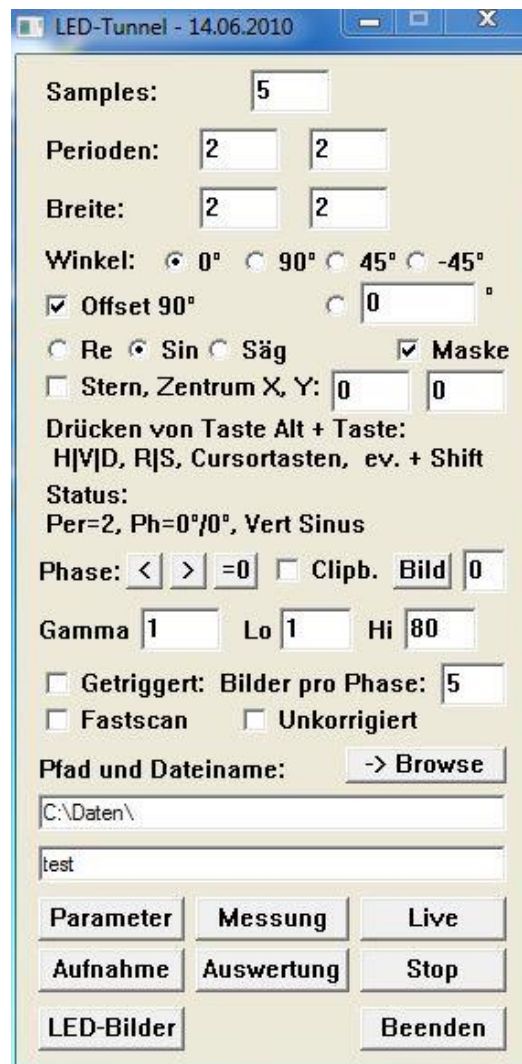


Abbildung 5: Fenster 1 - Oberfläche zur Steuerung des LED Tunnels

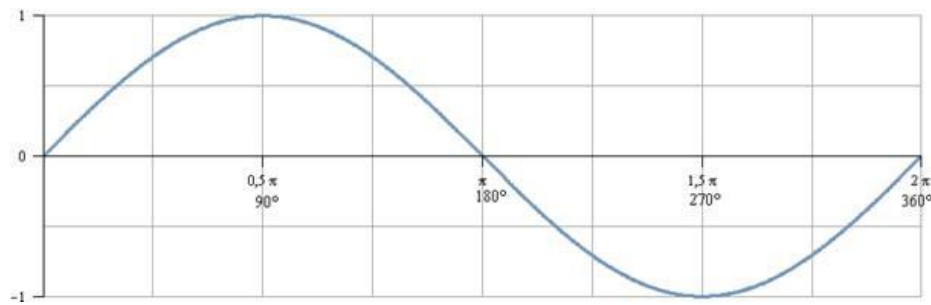


Abbildung 6: Fenster 2 - Anzeige der durch die Bedienoberfläche generierten Streifenmuster zur Vorabansicht/Kontrolle



### a) Samples

Mit **Samples** kann man die Anzahl der Aufnahmen innerhalb einer Periode regeln. Beispielsweise werden bei der Einstellung „3“ 3 Bilder in der Periode gemacht. Das heißt, dass der Sinus (Siehe Grafik 7) in drei gleich große Teile von Null bis  $2\pi$  eingeteilt wird. Bei gekreuzten Streifen müssen mindestens 5 Samples gemacht werden.



**Abbildung 7: Darstellung der Sinus Funktion zur Veranschaulichung der "Samples" Einstellungen [3]**

### b) Perioden

Bei **Perioden** muss immer die Normeinstellung 1 und 2 gewählt werden. 2 bedeutet die doppelte Abtastfrequenz. Nur so können die beiden Streifenrichtungen mathematisch voneinander getrennt werden.

### c) Breite

**Breite** heißt die Breite der Streifen in jeweiliger Streifenrichtung. Das heißt das erste Feld für die Breite der Streifen in Streifenrichtung 1 und das zweite für Streifenrichtung 2. Je matter das Testobjekt ist, desto breiter sollten die Streifen gewählt werden. Bei glänzenden Objekten werden die Streifen schmal gewählt. Hat man jedoch bei einem glänzenden Objekt einen größeren Defekt, welcher das Licht stark streut, wählt man zur genaueren Beurteilung des Defekts breitere Streifen. Die Einheit der Streifen ist Knoten. Vier LEDs (Viereck) sind ein Knoten. Mindestens vier Knoten sind für ein Sinusmuster nötig. Der LED-Tunnel hat 32 mal 44 Knoten.

Eine Homogenitätsabweichung von 4% ist mit einem astronomischen Spiegel messbar.

Wenn man bei einem Bild nur Rauschen als Ergebnis bekommt, kann es sein, dass das Testobjekt zu stark streut.

#### **d) Winkel**

Bei **Winkel** kann die Einstellung 0°, 90°, 45° und -45° ausgewählt werden. Das bedeutet welchen Winkel die Drehung der ersten Streifenrichtung hat. Die Richtung der Streifen ist je nach Textur des Testobjekts zu wählen.

Setzt man einen Haken bei **Offset 90°**, so stehen die beiden Streifenrichtungen senkrecht zueinander.

Beim nächsten Fenster kann die Verkipfung der beiden Streifenmuster in jeder beliebiger Gradzahl eingestellt werden.

#### **e) Phase**

Die Einstellung **Phase** dient mit Hilfe der Pfeiltasten dazu, die einzelnen Phasenbilder zu sehen. So kann man überprüfen, ob alle Einstellungen richtig gewählt wurden. Mit dem Button **=0** kann man wieder in die Ausgangsphase zurück springen.

#### **f) Hi/Lo Gamma**

**Gamma** zeigt an, wie die Kurve der Helligkeit verläuft. Diese Einstellung sollte bei eins belassen werden.

**Lo** bedeutet wie hell die dunkelsten und **Hi** wie hell die hellsten Streifen sein sollen. Die Einheit ist 8 Bit. Man sollte bei der Helligkeit aufpassen, dass man nicht übersteuert. Man kann Werte von 0 bis 255 eingeben. Sinnvoll sind Werte von 5 bis 255, da nicht alle LEDs auf Null kalibriert werden können. Bei Hi ist optimal 255 einzustellen, damit man aber nicht übersteuert, sollte man bei den Kameraeinstellungen (siehe VidApp-Verknüpfung) die Verschlusszeit regulieren. Dies kann mit dem Live-Bild überprüft werden (siehe VidApp-Verknüpfung).

## g) Weitere Funktionen

Das Programm verfügt über weitere Funktionen, welche jedoch für den normalen Betrieb nicht benötigt werden. Zur Vollständigkeit halber werden diese im Anhang erklärt.

### 1.4.4 Beispiele Streifenmuster

Zuerst wird die Tunneleinstellung gezeigt. Hier ist vor allem auf die Breite, den Winkel und den Offset zu achten. Diese Werte variieren bei nachfolgenden Beispielen.



Abbildung 8: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 9



Abbildung 9: Beispiel Streifenmuster - grobe gerade Linien

Bei diesem Beispiel ist jeweils eine Streifenbreite von 5 Knoten in  $0^\circ$  und ohne Offset zu sehen. Das heißt man hat hier relativ schmale Streifen, welche für die Vermessung von glänzenden Objekten geeignet sind.

Abbildung 10: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 11

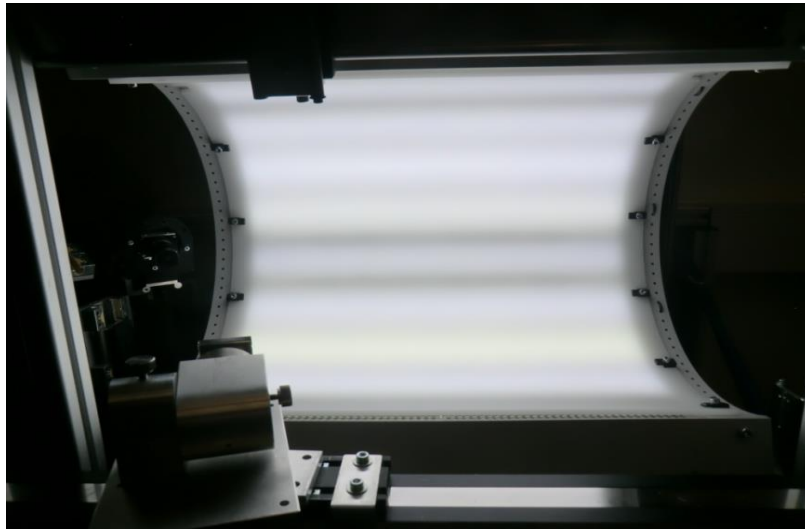


Abbildung 11: Beispiel Streifenmuster - feine gerade Linien

Hier sieht man in die eine Streifenrichtung schmale Streifen mit der Breite von 5 Knoten und in der anderen Streifenrichtung breitere Streifen von 20 Knoten. Der Winkel wird bei  $0^\circ$  belassen.

Abbildung 12: LED-Tunnel Einstellungen zu Abbildung 13

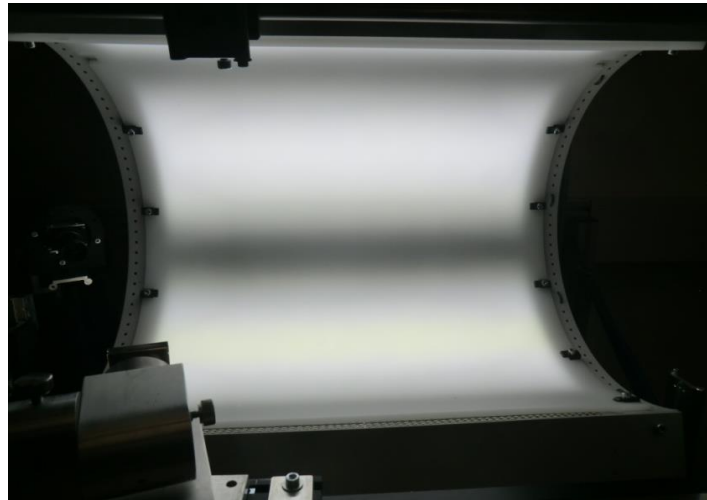


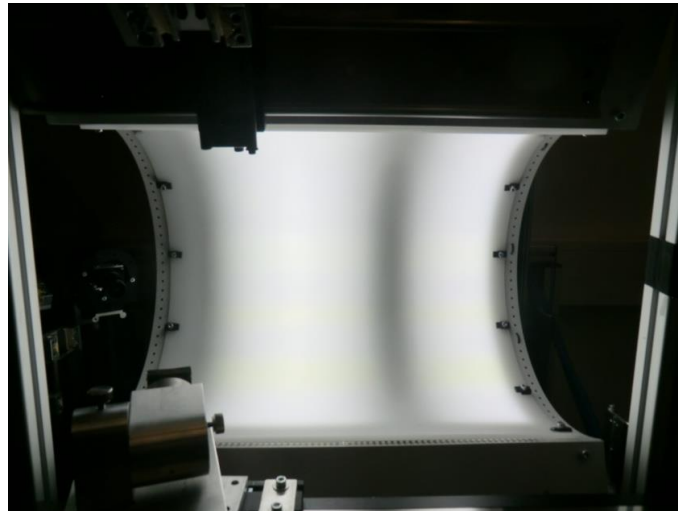
Abbildung 13: Beispiel Streifenmuster – breite Streifen

Grafik 9, 11 und 13 zeigen verschiedene Streifenbreiten in 0 Grad der Maske.

In Abbildung 13 sieht man wie bei Abbildung 9 und 11 einen Winkel von  $0^\circ$  und keinen Offset. Jedoch sind die Streifen in dieser Einstellung breit (20 Knoten) gewählt. Das heißt so könnte man matte Gegenstände vermessen.



Abbildung 14: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 15



**Abbildung 15: Beispiel Streifenmuster – breite Streifen in 90 Grad**

In Abbildung 15 sieht man dieselben Einstellungen wie in Abbildung 13, aber der Winkel ist hier 90°. Diese Einstellungen sind ebenfalls für matte Gegenstände geeignet. 90° wählt man aus, wenn die Körnung oder Politur eines Testobjekts in diese Richtung verläuft.



**Abbildung 16: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 17**



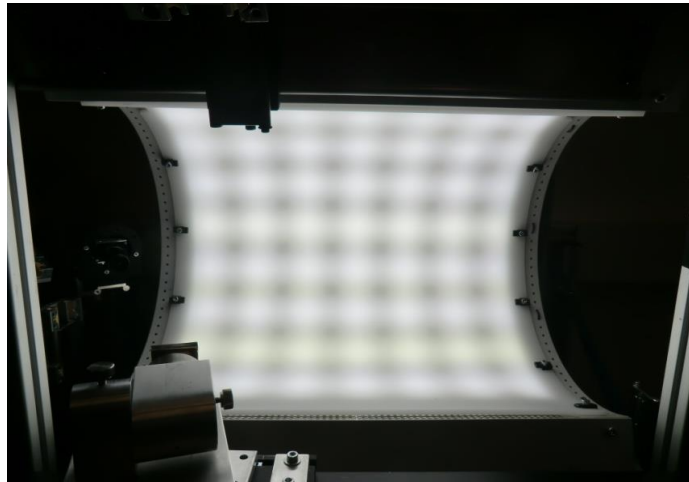


Abbildung 17: Beispiel Streifenmuster – schmale Streifen in 90 Grad

Grafik 15 und 17 zeigen unterschiedliche Streifenbreiten in 90 Grad.

Nun sind wieder ganz schmale Streifen (5 Knoten) gewählt worden in 90° mit einem Offset von 90°.



Abbildung 18: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 18



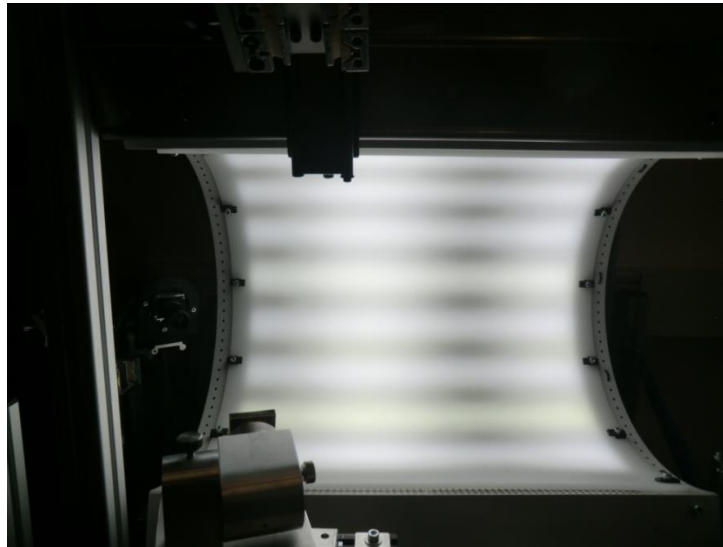
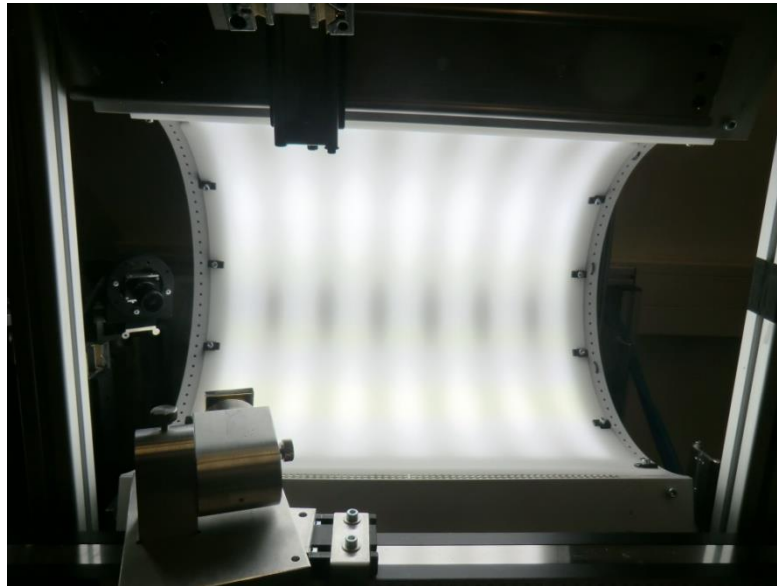


Abbildung 19: Beispiel Streifenmuster – Offset 0 Grad

Hier sieht man in eine Streifenrichtung schmale (5 Knoten) und in die andere Streifenrichtung breite Streifen (20 Knoten) in einem Winkel von  $0^\circ$  und ebenfalls mit dem  $90^\circ$  Offset.

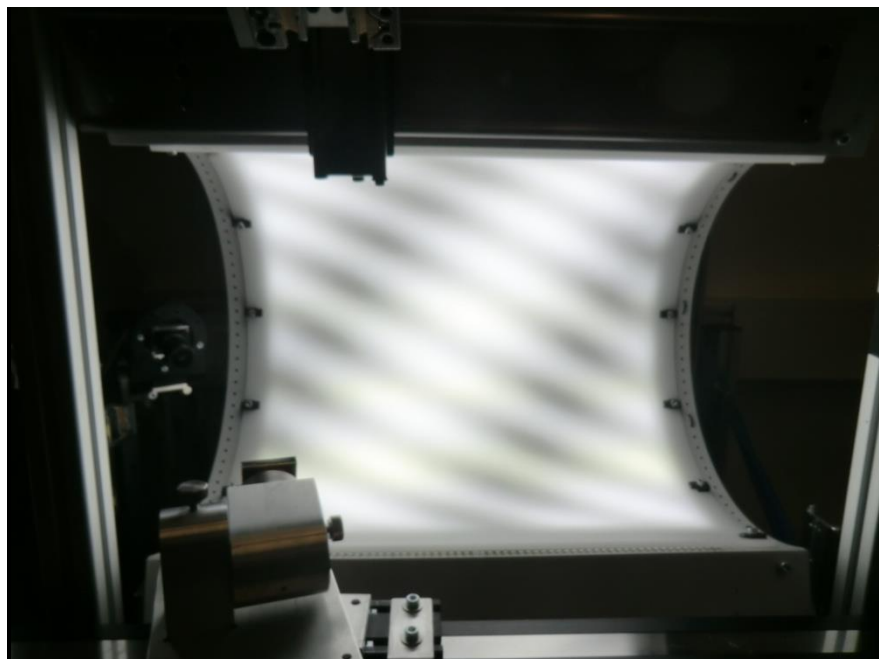
Abbildung 20: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 21



**Abbildung 21: Beispiel Streifenmuster – Offset 90 Grad**

Grafik 19 und 21 zeigen die Maske mit Offset in 0 und 90 Grad.

In Abbildung 21 hat man die selben Einstellungen wie in Abbildung 19 gewählt, bis auf der Winkel, welcher hier  $90^\circ$  beträgt.



**Abbildung 22: Beispiel Streifenmuster – Winkel 45 Grad**

Grafik 22 zeigt einen Winkel von 45 Grad.

Beim letzten Beispiel sieht man in Abbildung 22 einen Winkel von  $45^\circ$ .

Anmerkung: bei den Bildern der LED-Tunnel-Verknüpfung sollte die Periodenzahlen 1 und 2 sein, dies ändert jedoch das Maskenmuster des LED-Tunnels nicht, ist also für diese Aufnahmen nicht relevant

#### 1.4.5 Vid-App

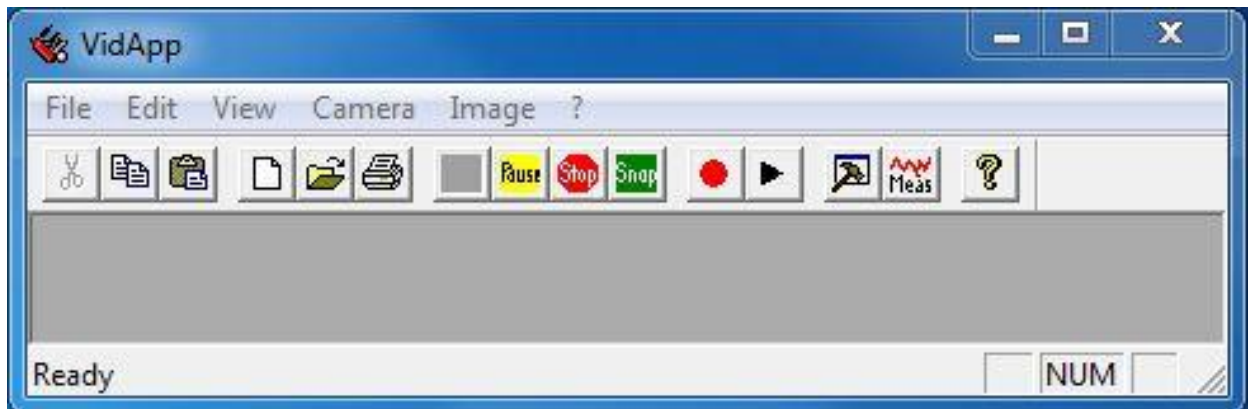


Abbildung 23: Vid-App-Verknüpfung

Beim Öffnen der VidApp-Verknüpfung öffnet sich dieses Fenster.

Hier kann es sein, dass beim Öffnen dieser App eine Fehlermeldung erscheint, diese einfach mit ok bestätigen.

##### a) Live-Aufnahme

Wichtig bei dieser App ist vor allem die hier in Abbildung 23 aktivierte graue Taste. Normalerweise steht Live auf dieser Taste, wird diese aktiviert, erscheint sie grau und ein weiteres Fenster öffnet sich mit der Live-Aufnahme der ausgewählten Kamera. Snap friert das Bild ein und macht ein einzelnes Bild mit der Kamera. Stop stoppt die Kamera und beendet den Live-Modus. Mit Pause stoppt man und macht mit der Messung weiter.

##### b) Hammer-Tool

Das Werkzeug-Tool Hammer ist für die Kamera-Einstellungen. Der Gain sollte minimal auf 400 gesetzt werden. Shutter bedeutet wie lang die Belichtungszeit (in Milli-Sekunden) ist. Man muss nun schauen, ob die Belichtungszeit, zum

Beispiel 0.1s passt, indem man das Streifenmuster durchschiebt und bei jeder Streifenbreite schaut, ob das Testobjekt überbelichtet ist. Unter Control entspricht Pixel der Helligkeit, wobei hier circa 220 optimal sind.

#### 1.4.6 Surf-Inspect-Viewer

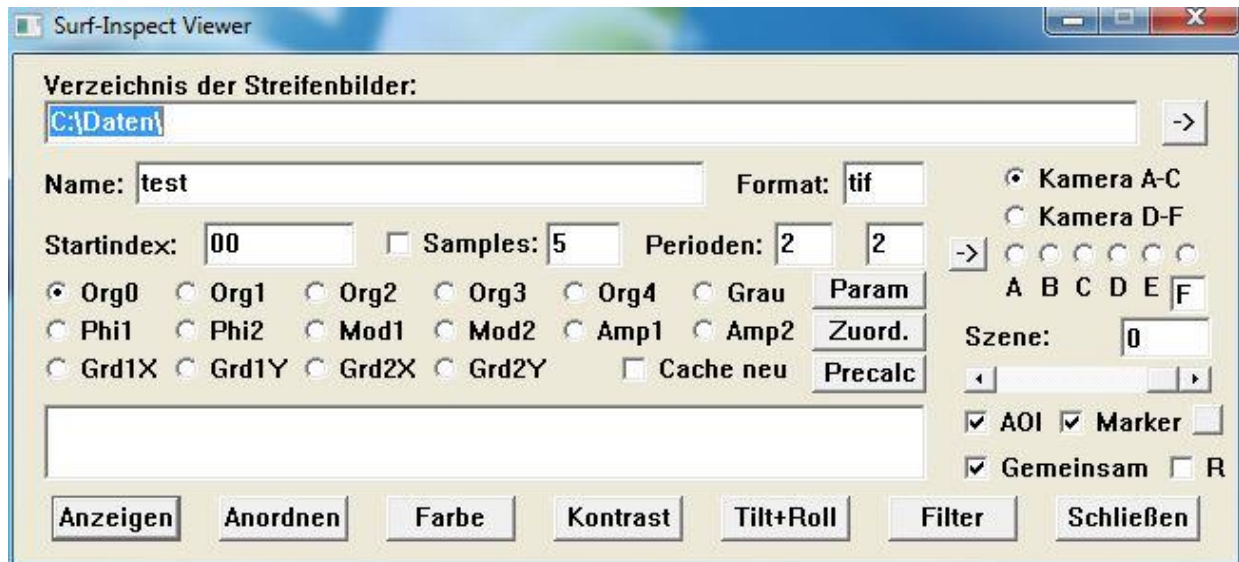


Abbildung 24: Surf-Inspect-Viewer

Beim Öffnen der SurfView-Verknüpfung wird dieses Fenster sichtbar.

Um einen der unteren Buttons in dieser App benutzen zu können, muss vorher ein Bild ausgewählt werden.

##### a) Auswahl Pfad

Das Verzeichnis der Streifenbilder, sowie der Name entsprechen dem Speicherpfad und dem Dateinamen wie bei der LED-Tunnel-Verknüpfung.

Das Format tif sollte beibehalten werden.

##### b) Kamera

Bei Kamera kann man die gewünschte Kamera auswählen. Die Auswahl der Kamera A-F und das anschließende Klicken der darunterliegenden Pfeiltaste gibt an, welche der Kameras angeschlossen ist. Kamera D-F funktioniert äquivalent dazu. Wenn man nur eine Kamera auswählt, bleibt man bei A.

### c) Bedeutung Bild-Abkürzungen

Die folgenden Abkürzungen sind die Bilder die die App später anzeigen soll. Sie stehen für:

**Org** = Original Bild (**1** bis **4**)

**Grau** = Mittelwert aus allen Aufnahmen

**Phi** = Steigungsbild = Phasenbild (**1**= Streifenrichtung 1, **2** = Streifenrichtung 2)

**Mod** = Normierung, also ein Teil-Amplitudenbild durch Graubild (**1,2** = Streifenrichtung)

**Amp** = Amplitudenbild (**1,2** = Streifenrichtung)

**Grd** = Ableitung Phi = Krümmung (**X,Y** = in welche Richtung (X=Krümmung, Y=Torsion, **1,2** = Streifenrichtung)

Die Rohbilder (Org) sind 8-Bit-Bilder, alle anderen Bilder, auf die alle Funktionen anwendbar sind, haben 16 Bits.

Mit diesen Bildern kann man eine Auswertung vornehmen. Beispielsweise kann man mit der rechten Maustaste eine AOI (=area of interest) über den gewünschten Bereich ziehen. Dann kann in dem gewählten Ausschnitt unter anderem den Mittelwert (MW), den root mean square (rms) und die Standardabweichung (StDev) anzeigen lassen (Im Surf Inspect-Viewer). Diese Werte sind auf 16 Bit bezogen, das heißt auf  $2^{16}$ , also auf 65536 Werte.

Außerdem kann das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und das Profil (mit Offset) des Testobjekts angezeigt werden. Beim Profil steht die x-Achse für die Pixel und die y-Achse für die Bits (maximal 16).

**Cache neu** heißt so viel wie ein „Reset“. Beispielsweise wenn noch Bilder im Speicher sind kann man durch diesen Haken neu anfangen.

#### d) Parameter Fenster

Mit Klick auf **Param** und Klick auf ein geöffnetes Bild (z.B. Phi1) erscheinen in dem weißen Feld im Surf-Inspect Viewer die Parameter, die zur Erstellung des Bildes nötig waren.

Bei **Zuord.** öffnet sich dieses Fenster:



Abbildung 25: Parameter-Zuordnung

Amp1u2 addiert beide, gibt also ein Gesamtbild. Hier kann man die Anordnung wählen, welches Bilder-Set angezeigt werden soll. Dieses öffnet sich dann automatisch nach Bestätigung mit OK auf dem Bildschirm. Die Abkürzung u summiert also zwei Messungen miteinander.

Mit Rechtsklick auf ein gemessenes Bild (Mitte) zoomt man in das Bild hinein, verkleinern kann man mit einem Klick auf den äußeren Rand. Außerdem kann man mit der Cursor-Taste der Maus sowohl zoomen, als auch wieder verkleinern.

#### e) Weitere Funktionen

Das Programm verfügt über weitere Funktionen, welche jedoch für den normalen Betrieb nicht benötigt werden. Zur Vollständigkeit halber werden diese im Anhang erklärt

#### **1.4.7 Durchführen einer Messung**

Nun soll zusammenfassend eine kurze Beschreibung einer Messung folgen:

Zuerst werden alle Apps geöffnet und das Messobjekt positioniert. Nun wird die Streifenbreite nach Oberflächenbeschaffenheit (glänzend: schmale, matt: breite Streifen) ausgewählt. Bei der LED-Tunnel-App das Live-Bild öffnen. Hier kann man dann überprüfen, ob die Maske auf dem Objekt sichtbar ist, und man muss die Kamera auf die Messoberfläche scharf stellen. Als nächstes wird bei der Vid-App der Hammer-Ikon geöffnet, um die richtige Belichtung (gain und shutter-time) einzustellen. Jetzt kann man bei der LED-Tunnel-App auf Aufnahme klicken. Nun kann man beim Surf-Inspect-Viewer mit einem Klick auf Anzeigen die Messungen sehen. Wichtig ist, dass der Pfad und der Dateiname bei der LED-Tunnel-App und beim Surf-Inspect-Viewer gleich ist, sonst wird nicht das aktuell gemessene dargestellt.

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Interferometrie

Als erstes soll ein Interferometer im Allgemeinen erklärt werden. Ein Interferometer produziert räumliche und oder zeitliche Interferenz, welche zu Messungen genutzt werden kann.

Das in den Messungen verwendete Interferometer (ALI 201) ist ein sogenanntes Fizeau-Interferometer. Es ist gekennzeichnet durch eine einfache Bauart und einen stabilen Aufbau (siehe Abbildung 26).

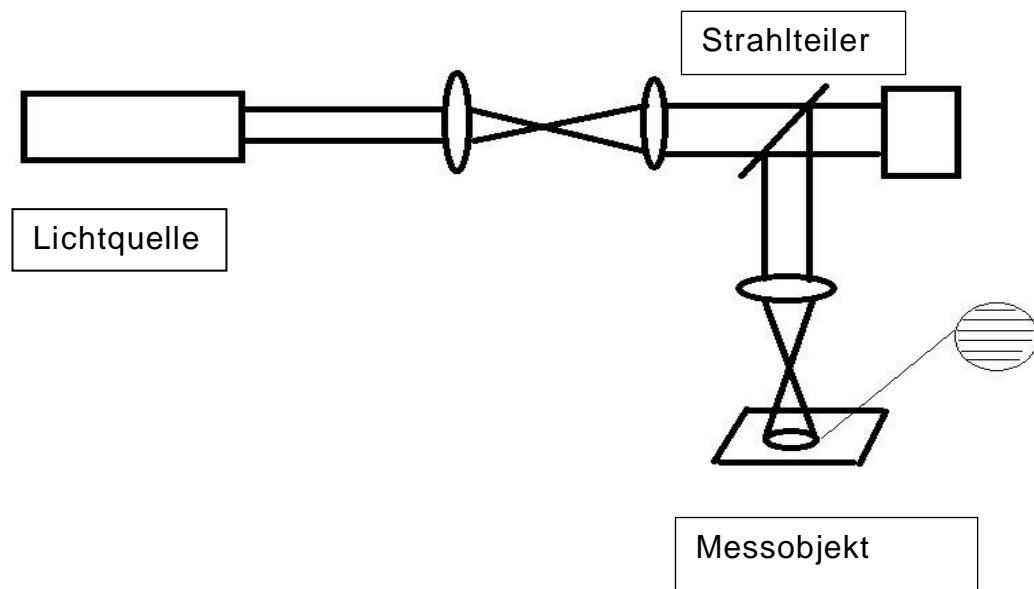


Abbildung 26: Aufbau eines Fizeau-Interferometers

Die Funktionsweise lautet wie folgt: Mit einer Lichtquelle (Laser) wird kohärente Strahlung erzeugt. Diese wird durch Optiken mit einem Kollimator telezentriert. Der Strahl wird von einem Strahlteiler geteilt. Ein Teil des Strahls trifft auf die Fizeauplatte, welcher zu einem gewissen Teil (etwa 4%) reflektiert wird. Dieser Teilstrahl wird als Referenzstrahl bezeichnet. Der andere Teil des Strahls vom Testobjekt wird von der Oberfläche reflektiert. Es entsteht eine Interferenz der beiden Strahlen. Das so entstandene Oberflächen-Interferogramm wird mit einer



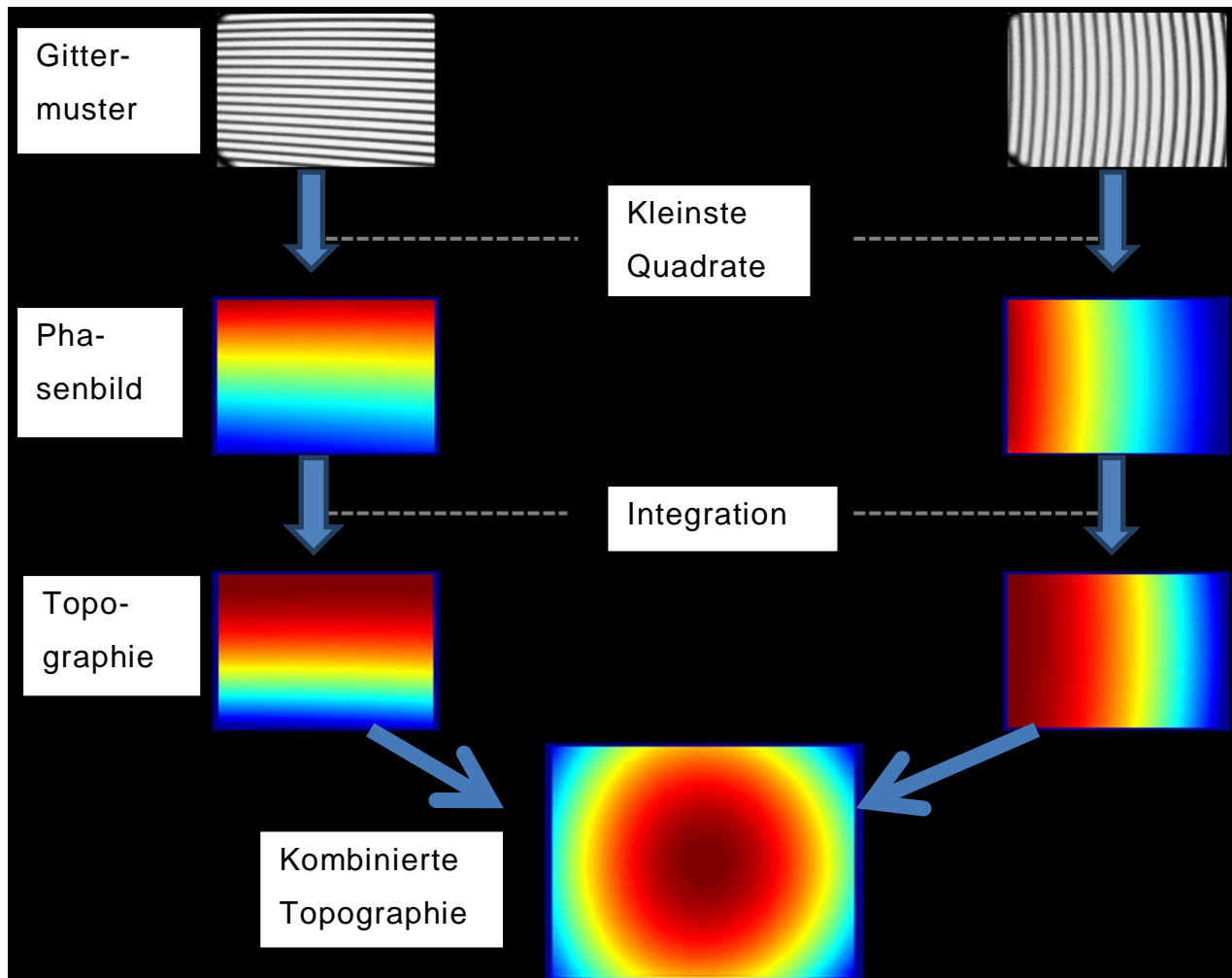
Soll- oder Planfläche verrechnet und man erhält die Oberflächenform des Messobjekts. [4]

## **2.2 Deflektometrie**

Deflektometrie ist ein Messverfahren für Oberflächen durch spiegelnde Reflexion.

Als Vorteile sind zu nennen, dass das Deflektometer ein robustes Messgerät ist und dass die Messempfindlichkeit vor Allem durch die Kamera-Sensorauflösung gegeben ist, aber auch durch wellenoptische Effekte begrenzt wird. Dieses Messverfahren ist wichtig für die Industrie, insbesondere für die Gütebeurteilung von lackierten Fahrzeugteilen. [5]

Nun soll die allgemeine Funktion eines Deflektometers beschrieben werden. Ein Gitter wird auf das Testobjekt projiziert. Das Gittermuster wird von der Oberfläche des Objekts reflektiert und dieses wird dann von einem Sensor (Kamera) aufgenommen. Mit Hilfe der Phasenverschiebung wird jeder Punkt auf dem Objekt dem richtigen Pixel zugeordnet. Ein solches Deflektometer nennt sich PMD, was auf Englisch phase measuring deflectometer heißt. Um das Gittermuster zu interpretieren benutzt man einen Algorithmus der kleinsten Quadrate. Dieser berechnet die Phase daraus. [6] In der folgenden Grafik ist der Messprozess eines Deflektometers bildnerisch dargestellt.



**Abbildung 27 : Messprozess eines Deflektometers [6]**

Dann erhält man durch Integration des Phasenbildes die relative Höhe von jedem Punkt der Oberfläche. Die Integration muss in horizontaler und vertikaler Richtung vorgenommen werden. Nun werden diese Daten miteinander kombiniert durch eine kumulative Summenbildung und so erhält man schließlich die Oberflächenform des Messobjekts. Um die absolute Höhe des so gemessenen Objektes zu erhalten, muss der komplette Messaufbau kalibriert werden. Hierbei werden zunächst Messobjekte mit vorhanden bekannter Oberflächenform vermessen. Anschließend werden diese Daten genommen um die Kalibrierungsfaktoren des Systems zu ermitteln.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Geeignete Oberflächen**

#### **3.1.1 Versuchsbeschreibung**

Es soll getestet werden, welche Oberflächen und Materialeigenschaften für die Oberflächenmessung am Deflektometer geeignet sind. Dazu werden zuerst mit dem Interferometer ALI 201 Messungen gemacht, um einen Vergleichswert zu haben. Das Gerät wird unkalibriert verwendet. Die Messungen werden nicht direkt miteinander verglichen, da es sich nicht um die gleichen Messmethoden handelt, und das Deflektometer auch nur mit der Tunnel-Kalibrierung misst. Die Messdaten beim Interferometer werden mit Metro Pro ausgewertet. Hier werden die Fehler 4. Ordnung, die durch die Kamera und die verwendeten optischen Oberflächen im System entstehen, entfernt, und die Ausreißer durch eine Polygon-Maske eliminiert. Anschließend werden die Daten in Excel übertragen, um eine Varianz zu errechnen. Die Varianz beruht auf fünf Messungen. Diese werden unmittelbar hintereinander unter gleichen Bedingungen durchgeführt, um externe Fehlerquellen zu minimieren.

#### **3.1.2 Messungen mit dem ALI 201**

Es werden nun drei verschiedene plane Glasflächen mit dem ALI 201 vermessen. Der gemittelte rms ergibt sich aus fünf direkt aufeinanderfolgenden Messungen. Die gestrichelte Linie in den Excel-Diagrammen ist die Trendlinie.  $R^2$  ist die Varianz, welche man von den fünf Messungen erhält.

## 1. Messobjekt: Eckig\_Plan\_3:



Abbildung 28: Messobjekt Eckig\_Plan\_3

Diese plane, eckige Glasfläche wird mit dem ALI 201 vermessen und erhält folgenden gemittelten root mean square:

- MW (rms) = 0,0842  $\mu\text{m}$

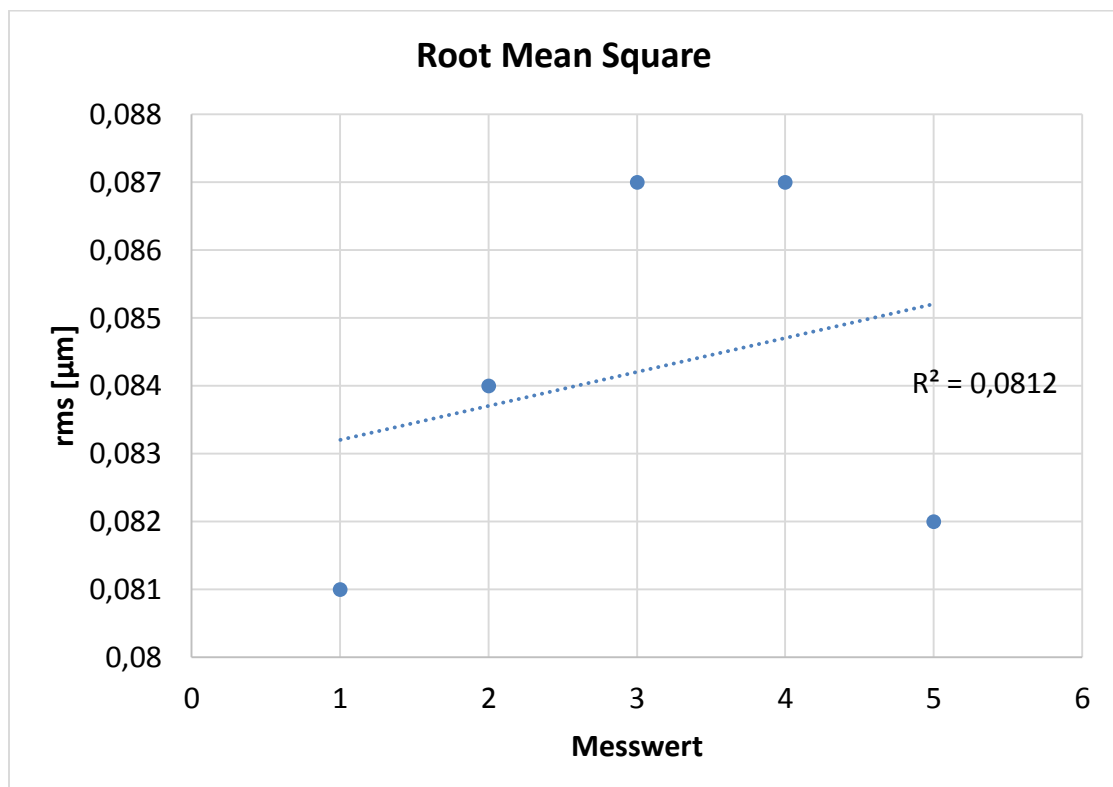
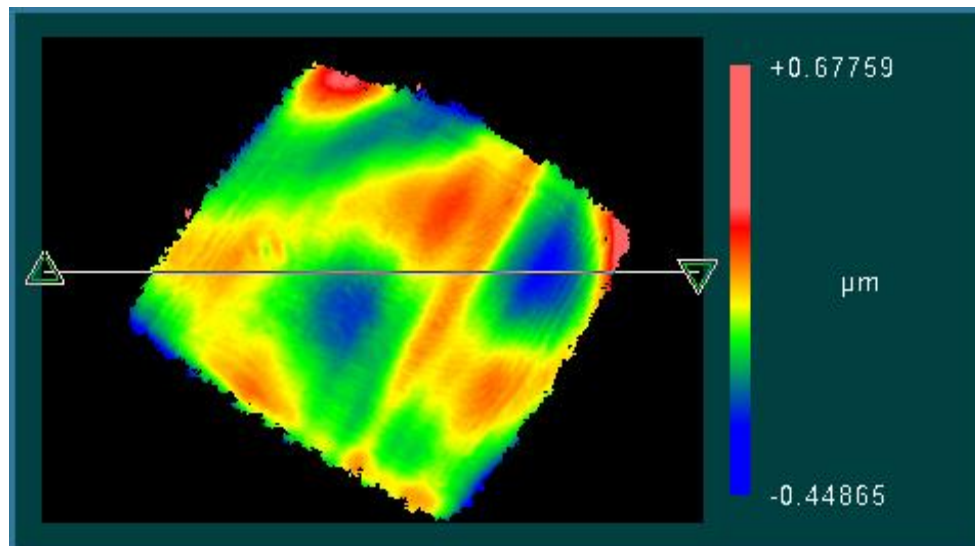
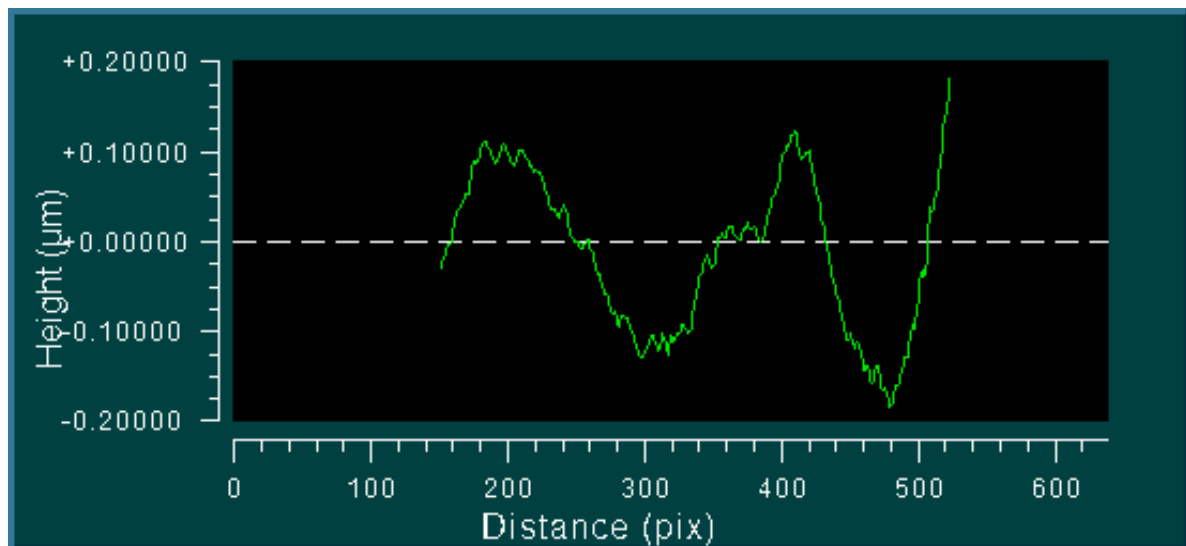


Abbildung 29: rms von Messobjekt Eckig\_Plan\_3



**Abbildung 30: Oberflächenprofil von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**



**Abbildung 31: Profilausschnitt von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

Die Messfeldgröße in Abbildung 30 ist das Testobjekt, welches in Abbildung 28 zu sehen ist.

Hier sieht man einen Ausschnitt über die gemessene Oberfläche (siehe Abbildung 31). Das obere Bild (Abbildung 30) zeigt wo der Schnitt gesetzt wurde.

## 2. Messobjekt: Eckig\_Plan\_6:

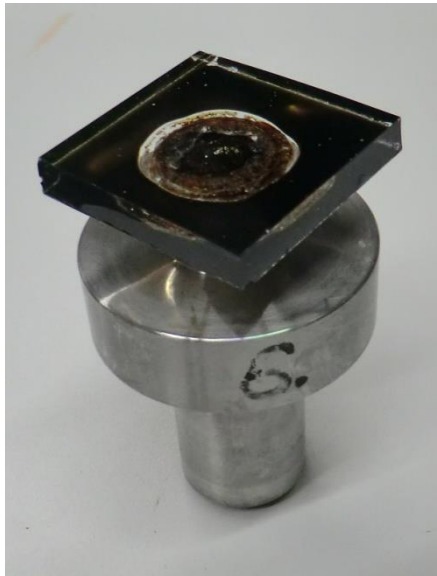


Abbildung: 32: Messobjekt Eckig\_Plan\_6

Diese plane, eckige Glasfläche wird mit dem ALI 201 vermessen und erhält folgenden gemittelten root mean square:

- $MW(rms)=0,0664 \mu m$

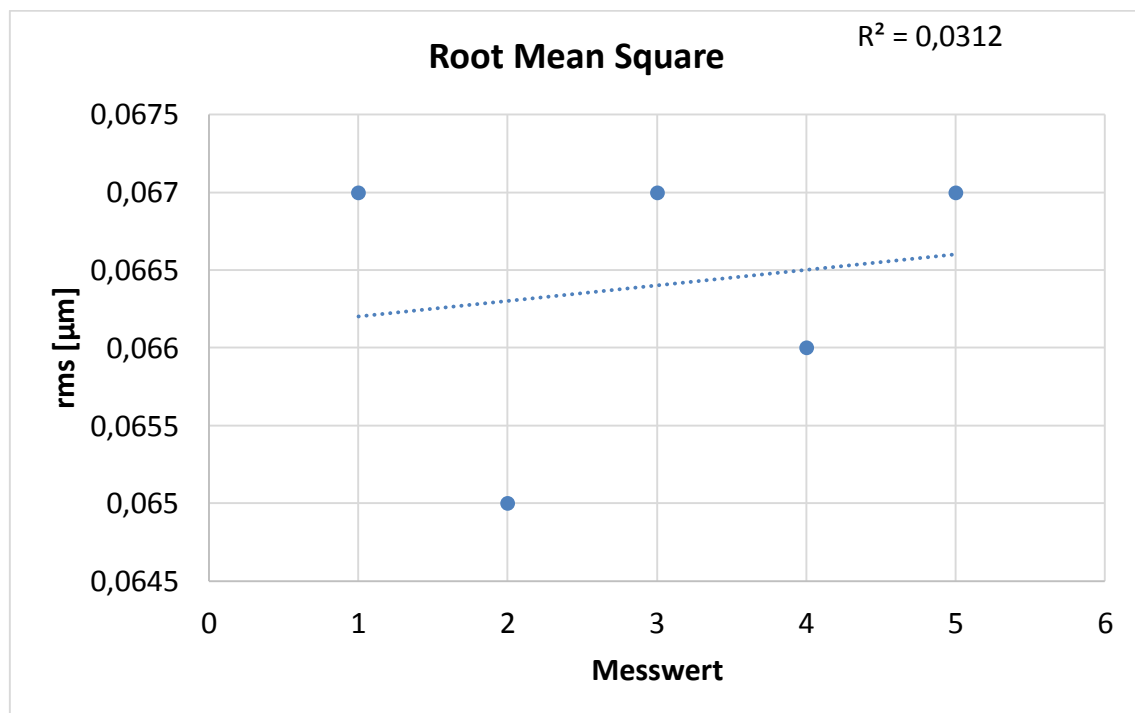
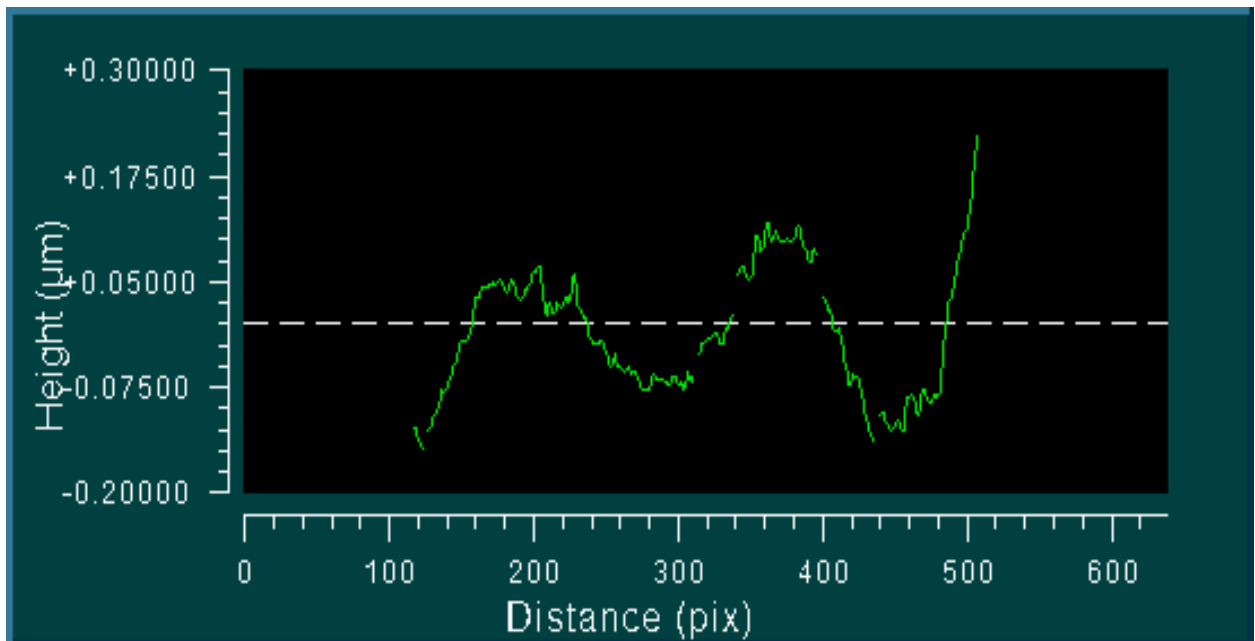


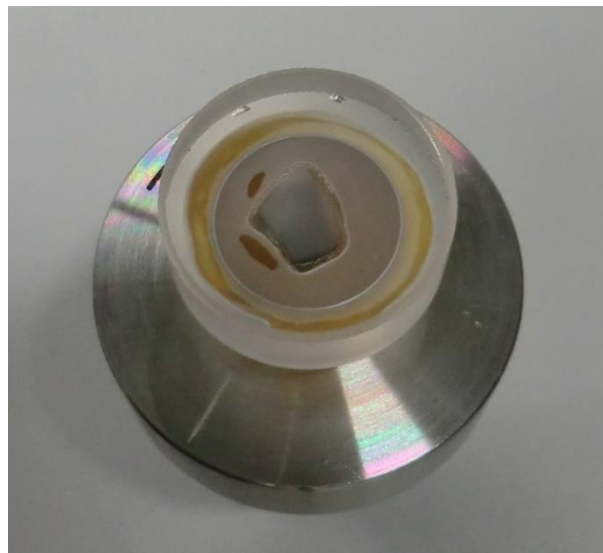
Abbildung 33: rms von Messobjekt Eckig\_Plan\_6



**Abbildung 34: Profilausschnitt von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

In Abbildung 34 sieht man einen Ausschnitt des Profils des Messobjekts Eckig\_Plan\_6

3. Messobjekt: Rund\_Plan\_2:



**Abbildung 35: Messobjekt Rund\_Plan\_2**

Diese plane, runde Glasfläche wird mit dem ALI 201 vermessen und erhält folgenden gemittelten root mean square:

- $MW(rms) = 0,0652 \mu m$

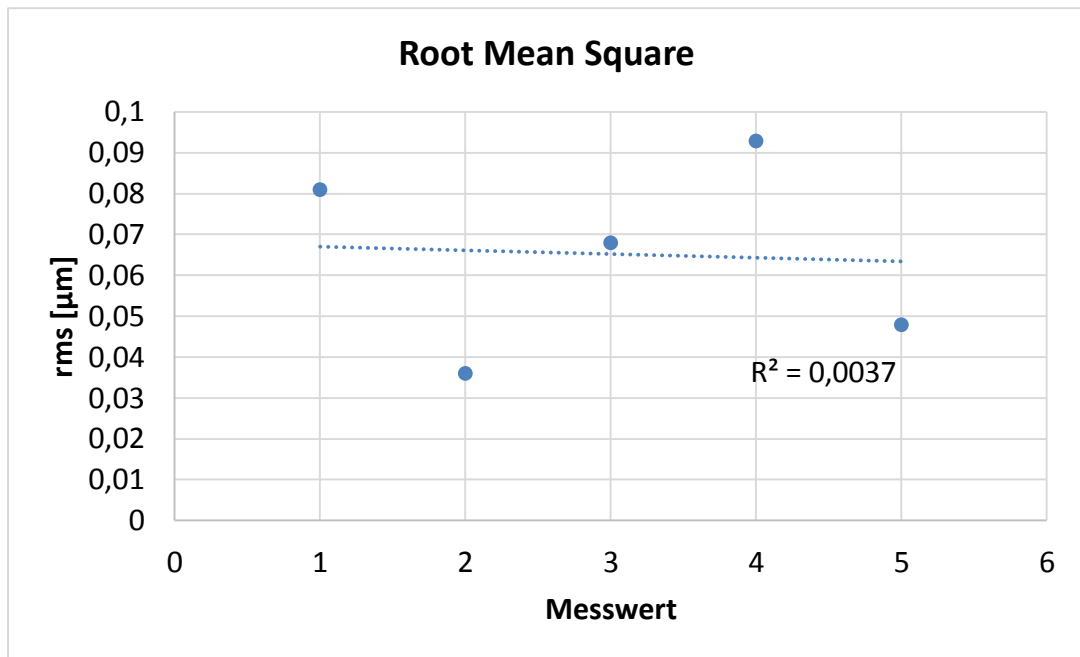


Abbildung 36: rms von Messobjekt Rund\_Plan\_2

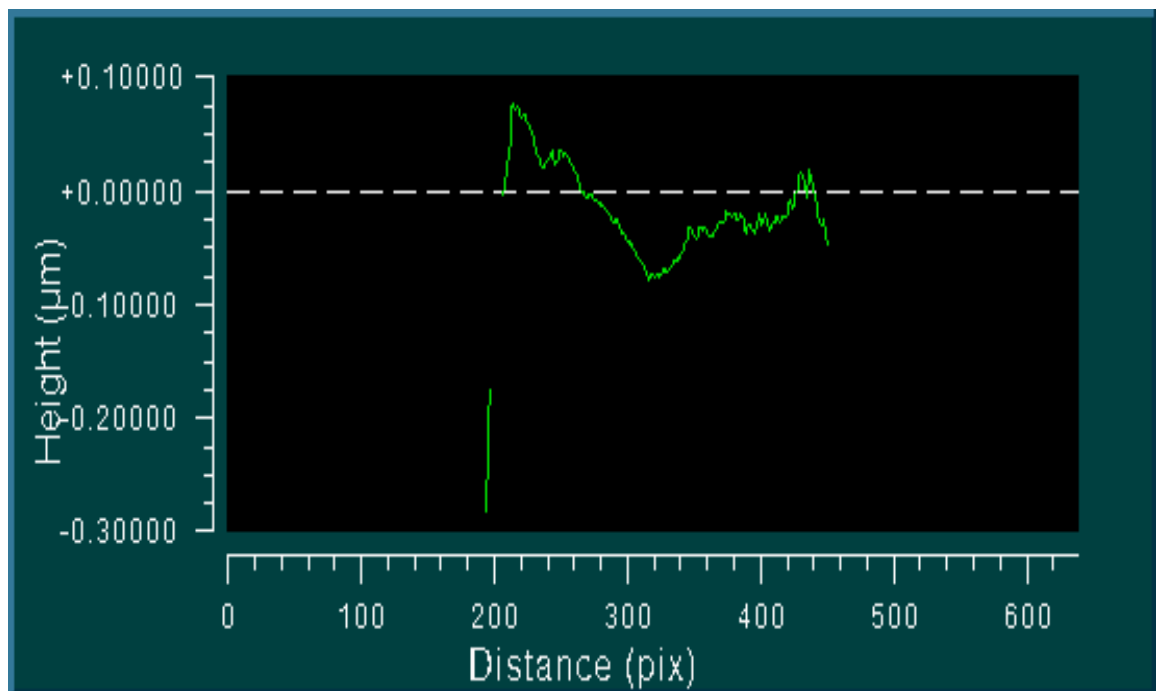
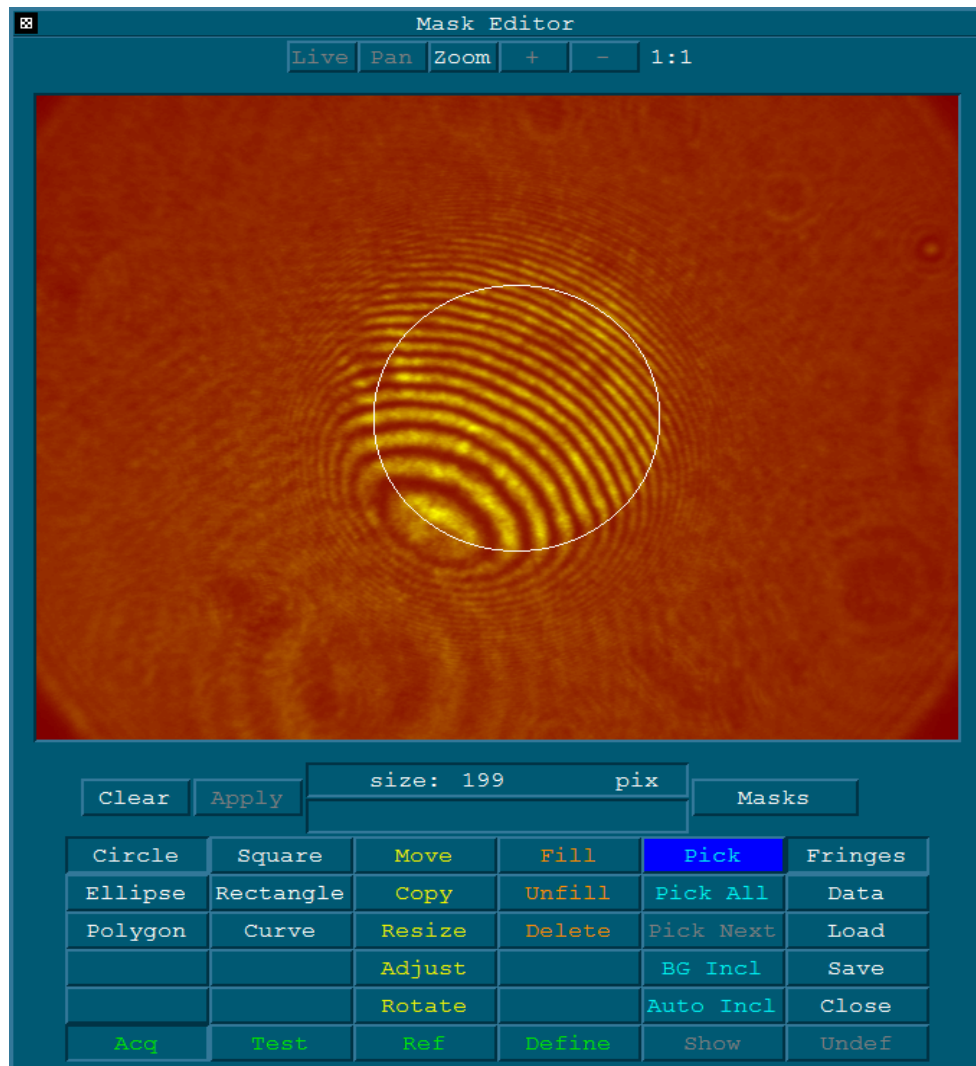


Abbildung 37: Profilausschnitt von Messobjekt Rund\_Plan\_2





**Abbildung 38: Streifenbild auf Messobjekt Rund\_Plan\_2**

Hier (Abbildung 38) sieht man die Maskierungsoptionen von MetroPro. Die Streifen, welche man im Bild sieht, sind die entstandenen Interferenzen. Der Kreis zeigt an, welchen Bereich man für die spätere Auswertung verwendet.

Bei allen Messungen am ALI 201 erhält man, bei der Anzahl von fünf Messungen, eine geringere Varianz des rms als 0,1. Dieser Wert soll als Anhaltspunkt dafür genommen werden, damit man die Ergebnisse des Deflektometers (siehe nachfolgendes Kapitel) einschätzen kann.

### 3.1.3 Messungen mit dem Deflektometer mit LED-Tunnel

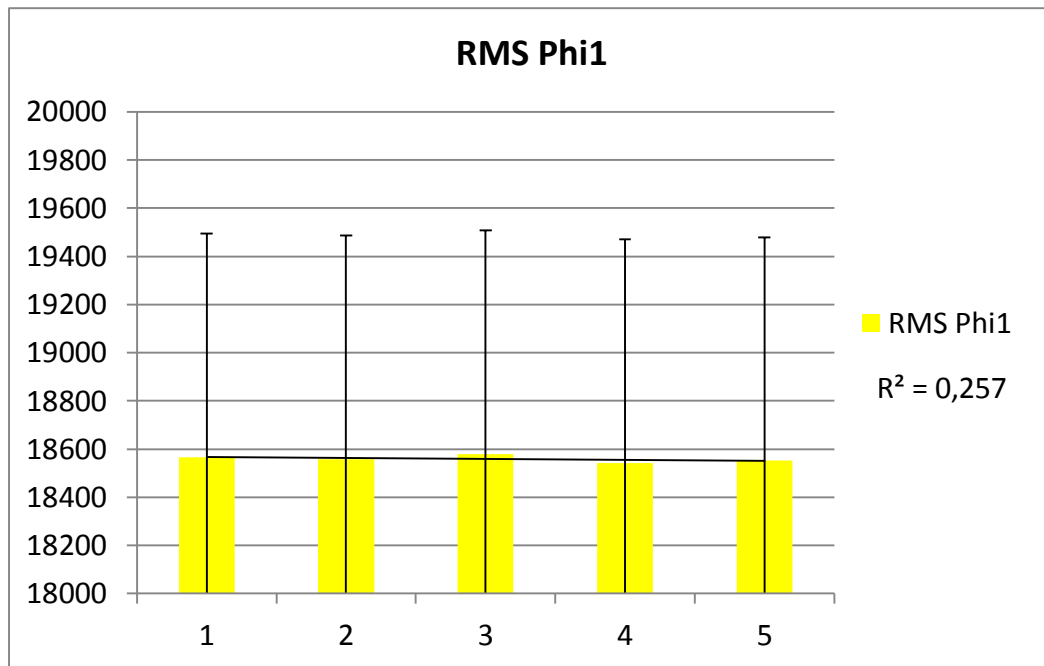
Zuerst wird von jedem Messobjekt ein Bild gezeigt, damit man weiß, was gemessen wurde. Es werden fünf Messungen durchgeführt. Nun erhält man das Phasenbild (=Steigungsbild) in beiden Streifenrichtungen (Phi1 und Phi2). Man sieht jeweils dieses Bild einer Messung. Außerdem wird mit Hilfe von Excel die Varianz ( $R^2$ ) der fünf Messungen des rms gebildet. Die Trendlinie und die Fehlerindikatoren wurden hinzugefügt. Es werden ebenfalls fünf Messungen durchgeführt, damit die Messungen besser mit dem ALI201 vergleichbar sind.

Die x-Achse ist jeweils die Anzahl der Messung und die y-Achse ist der rms in Bit (bezogen auf 16 Bit, also  $2^{16}$  Informationen)

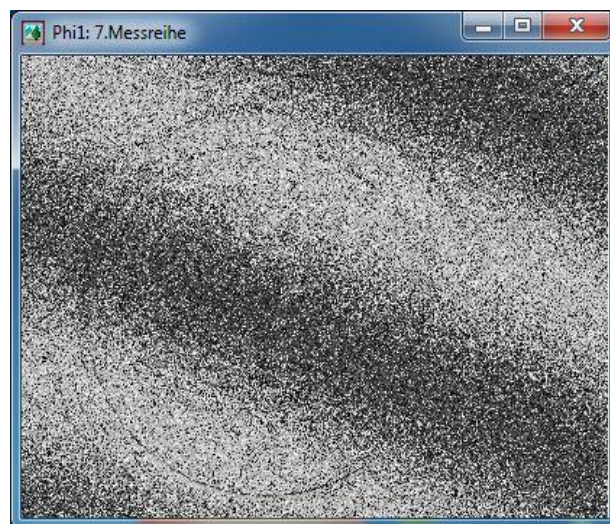
1. Messobjekt: Eckig\_Plan\_3:



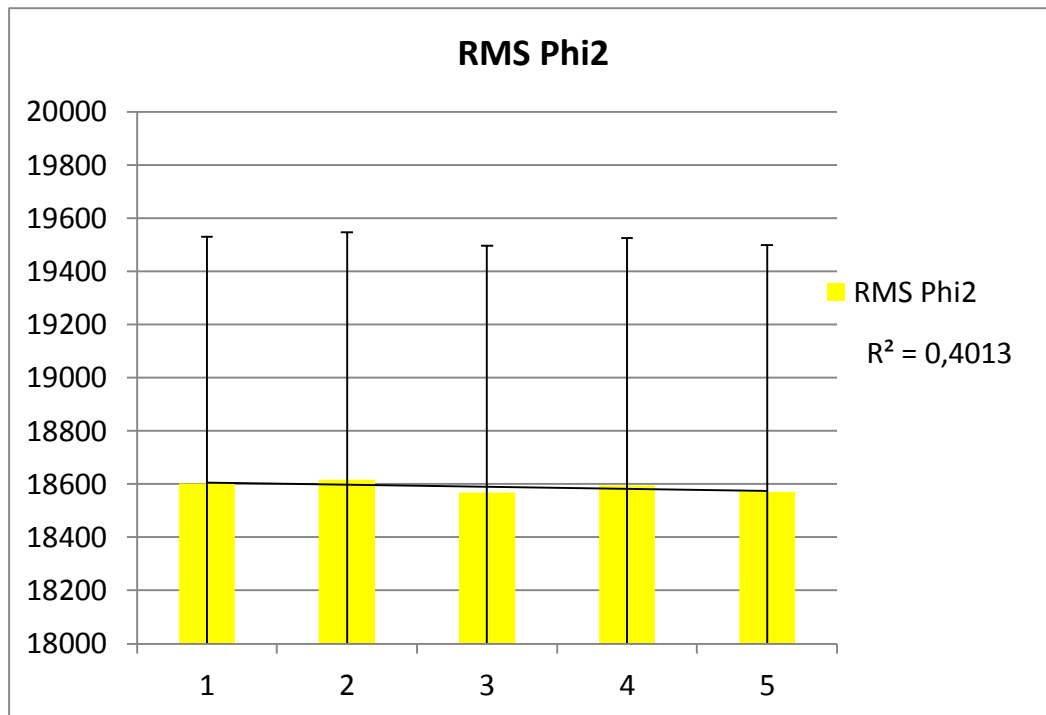
Abbildung 39: Messobjekt Eckig\_Plan\_3



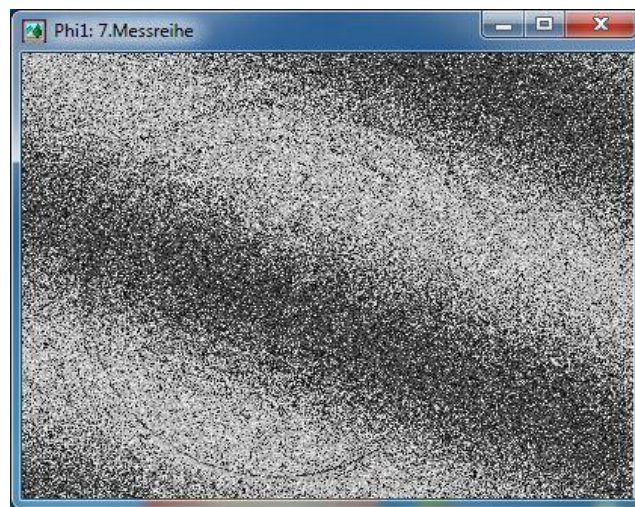
**Abbildung 40: rms Phi1 von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**



**Abbildung 41: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**



**Abbildung 42: rms Phi2 von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**



**Abbildung 43: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

Man sieht bei hier bei diesen Ergebnissen (Abbildung 40 und 42), dass die Varianz deutlich höher als 0,1 ist, daher nicht so gut geeignet ist.

2. Messobjekt: Eckig\_Plan\_6:

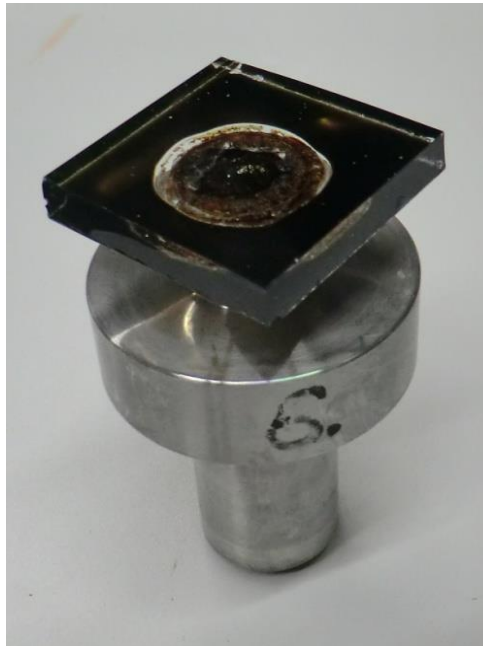


Abbildung 44: Messobjekt Eckig\_Plan\_6

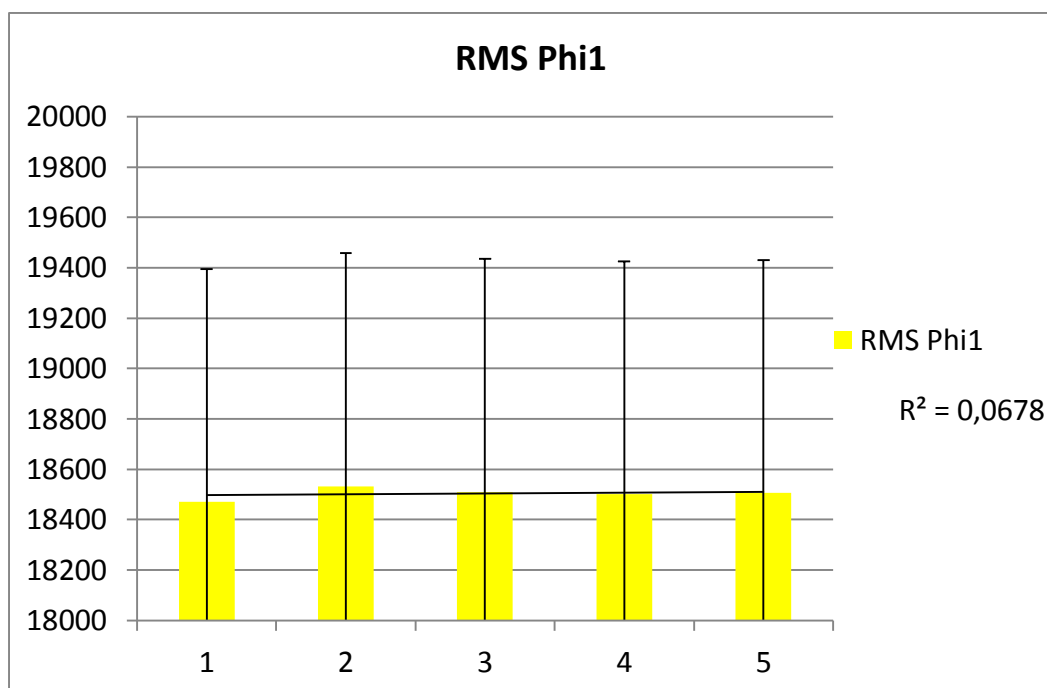


Abbildung 45: rms Phi1 von Messobjekt Eckig\_Plan\_6

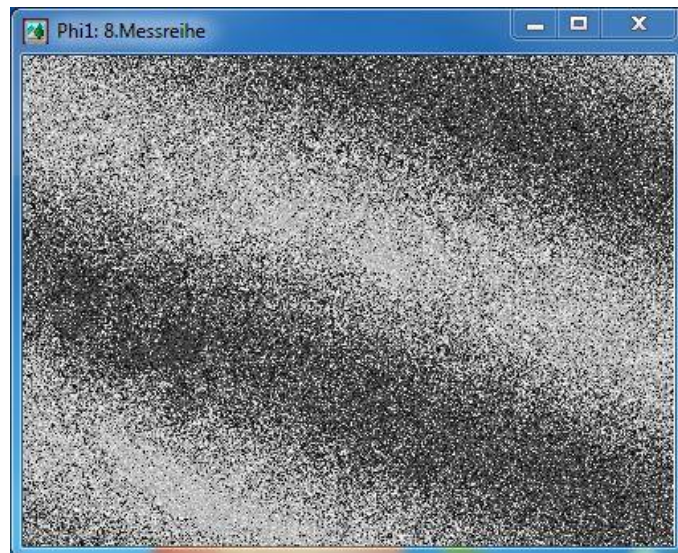


Abbildung 46: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Eckig\_Plan\_6

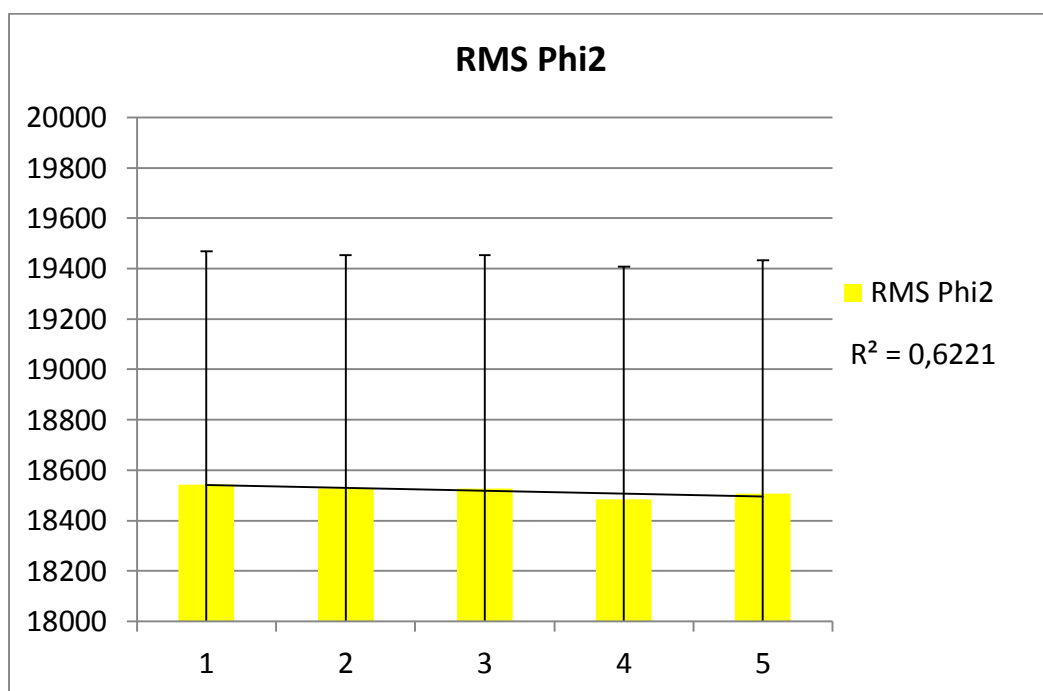
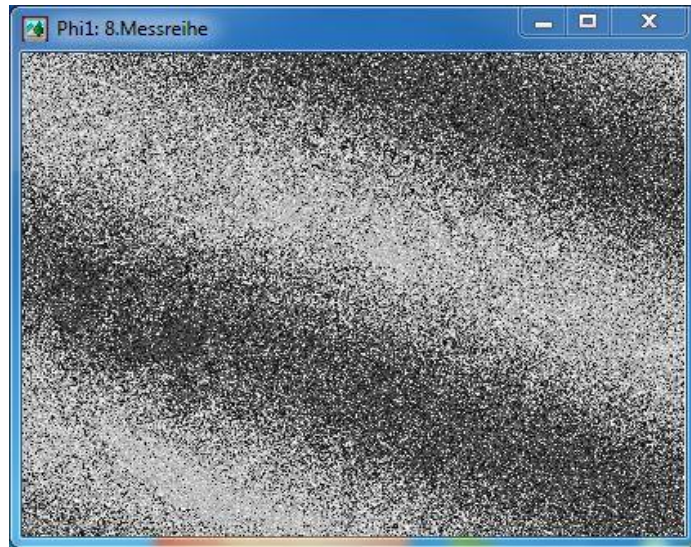


Abbildung 47: rms Phi2 von Messobjekt Eckig\_Plan\_6

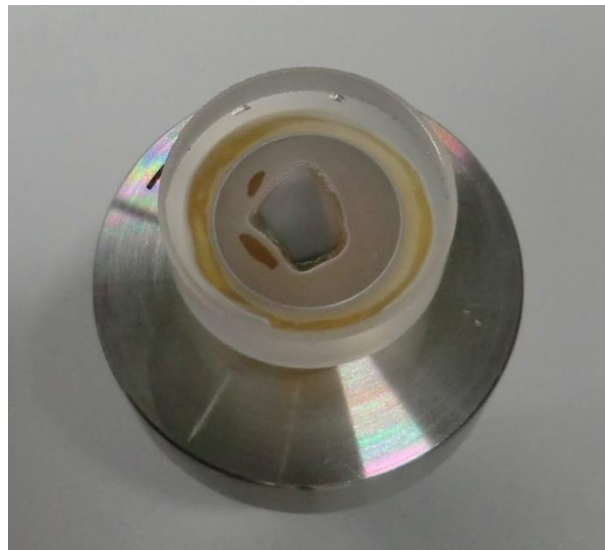




**Abbildung 48: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

Bei diesem Objekt ist die Varianz bei Phi1 um einiges geringer als bei Phi2. Die hohe Unterschiedlichkeit in beiden Streifenrichtungen zeigt, dass es kein geeignetes Messobjekt für die Vermessung am Deflektometer ist.

3. Messobjekt: Rund\_Plan\_2:



**Abbildung 49: Messobjekt Rund\_Plan\_2**

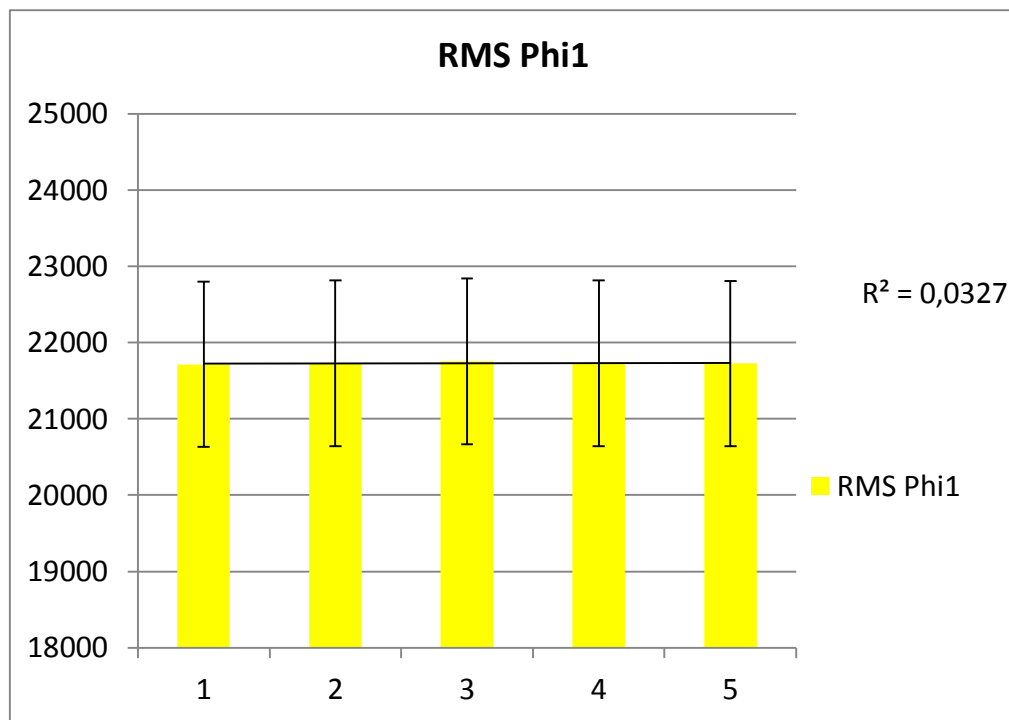
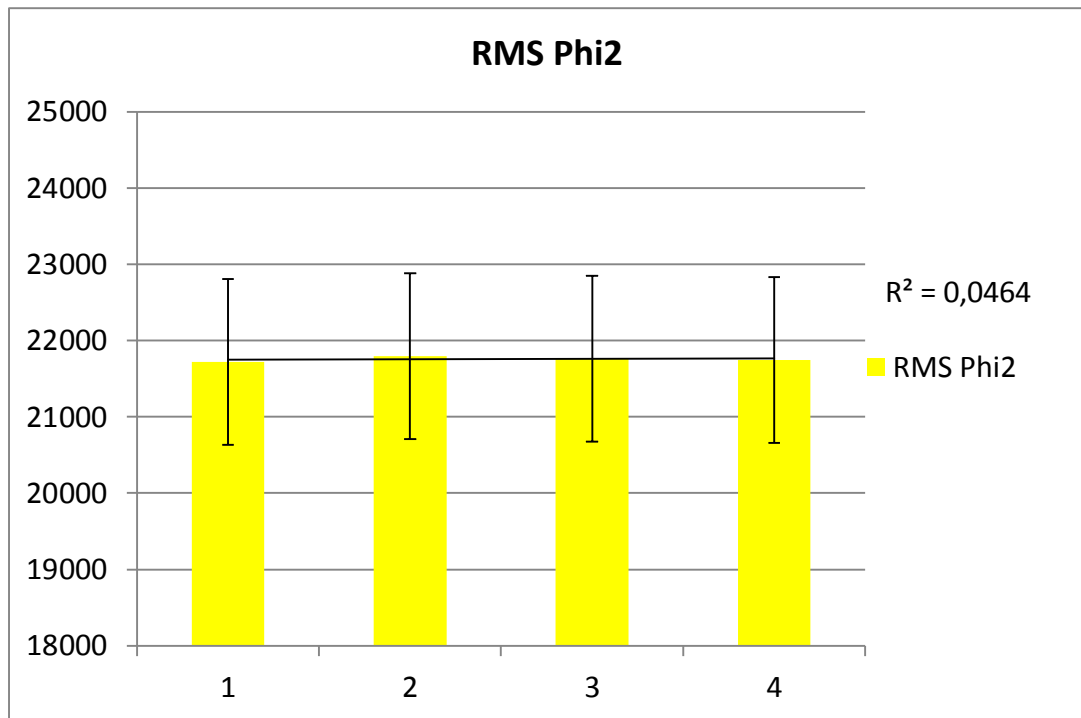


Abbildung 50: rms Phi1 von Messobjekt Rund\_Plan\_2



Abbildung 51: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Rund\_Plan\_2





**Abbildung 52: rms Phi2 von Messobjekt Rund\_Plan\_2**



**Abbildung 53: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Rund\_Plan\_2**

Hier ist bei beiden Steigungsbildern eine Varianz von unter 0,1 zu sehen. Das bedeutet zwar, dass die Messungen an sich ähnlich sind, aber noch lange nicht, dass diese gut sind. Schon in Abbildung 53 ist zu erkennen, dass es ein hohes Rauschen gibt und die Streifen nicht klar zu erkennen sind. Also können die Streifen auch nicht richtig detektiert werden. Das liegt hier vermutlich an den Rückflächenreflexe des Glases, welches für diese Messungen verwendet wurde.

## 4. Messobjekt: Quarzglas:

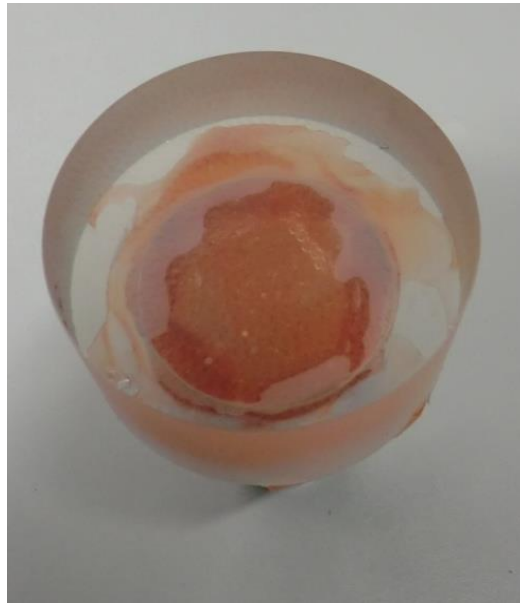


Abbildung 54: Messobjekt Quarzglas

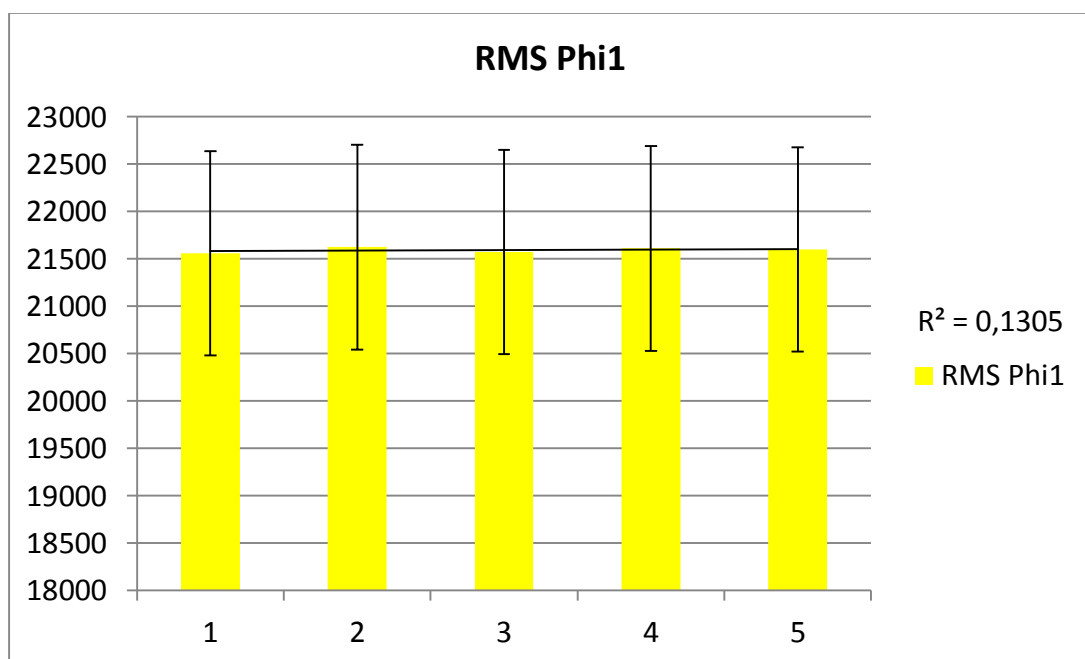


Abbildung 55: rms Phi1 von Messobjekt Quarzglas

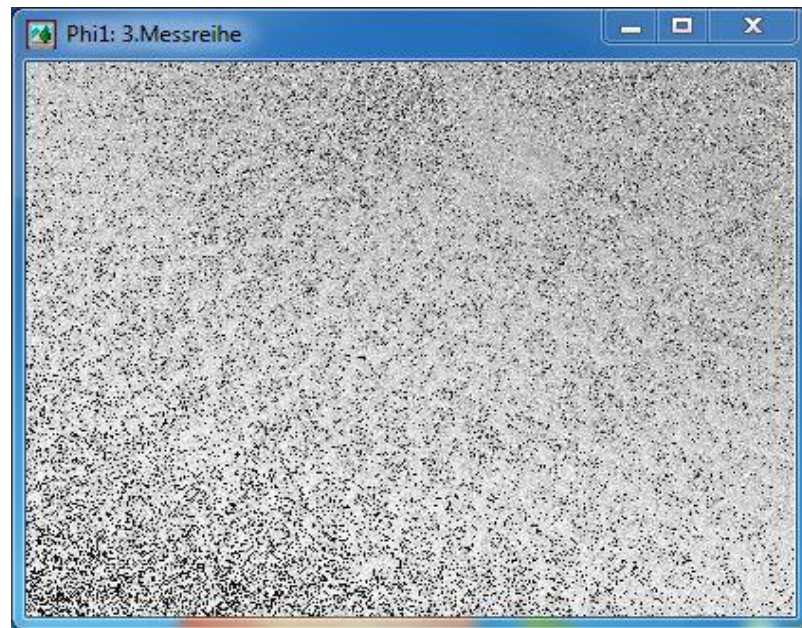


Abbildung 56: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Quarzglas

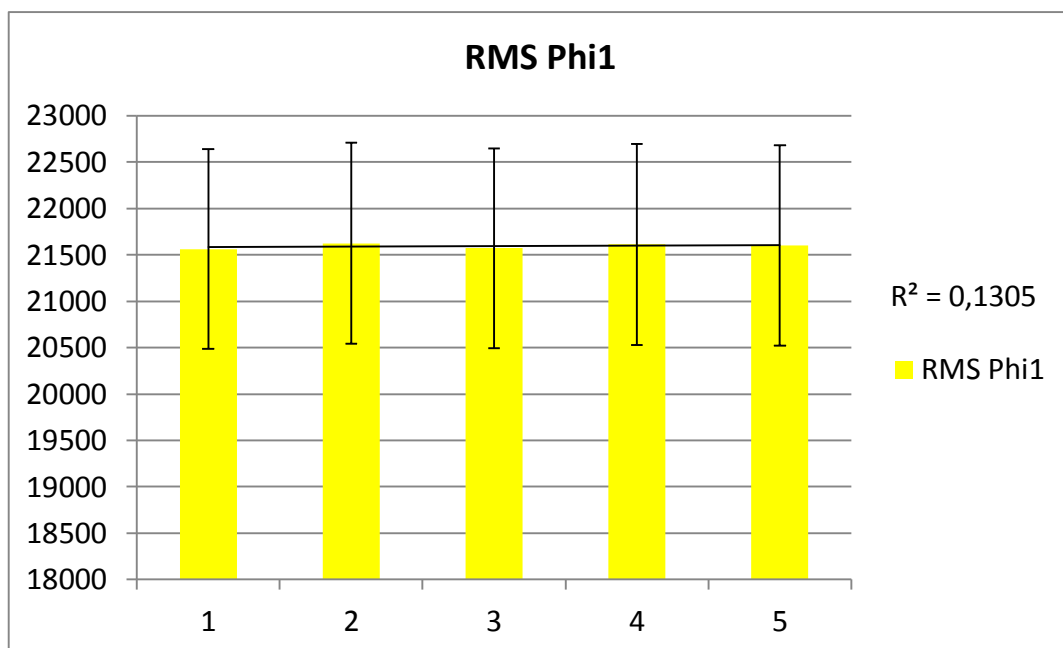
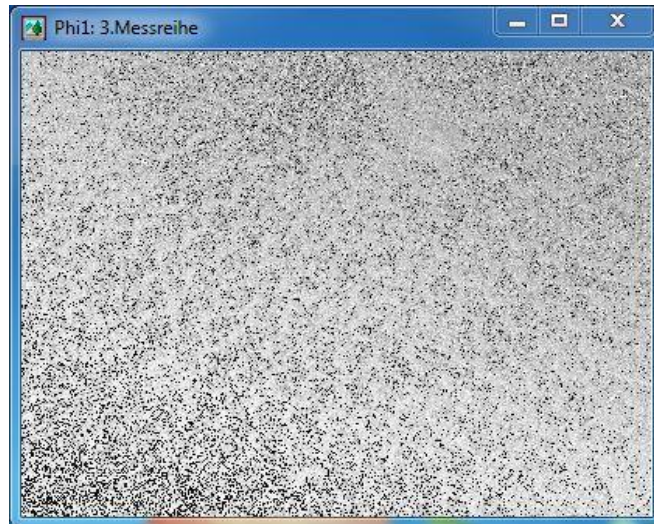


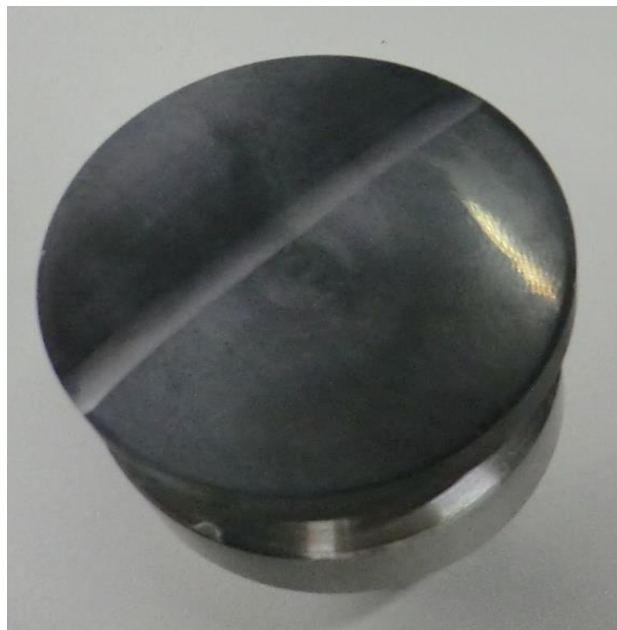
Abbildung 57: rms Phi2 von Messobjekt Quarzglas



**Abbildung 58: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Quarzglas**

Die Varianz beträgt über 0,1, ist also für unsere Messungen nicht sehr gut geeignet. Hier zeigt sich aber auch bei der genaueren Betrachtung der der Phasenbilder, die Oberflächenstrukturen des Quarzglases.

5.Messobjekt: Grafit



**Abbildung 59: Messobjekt Grafit**



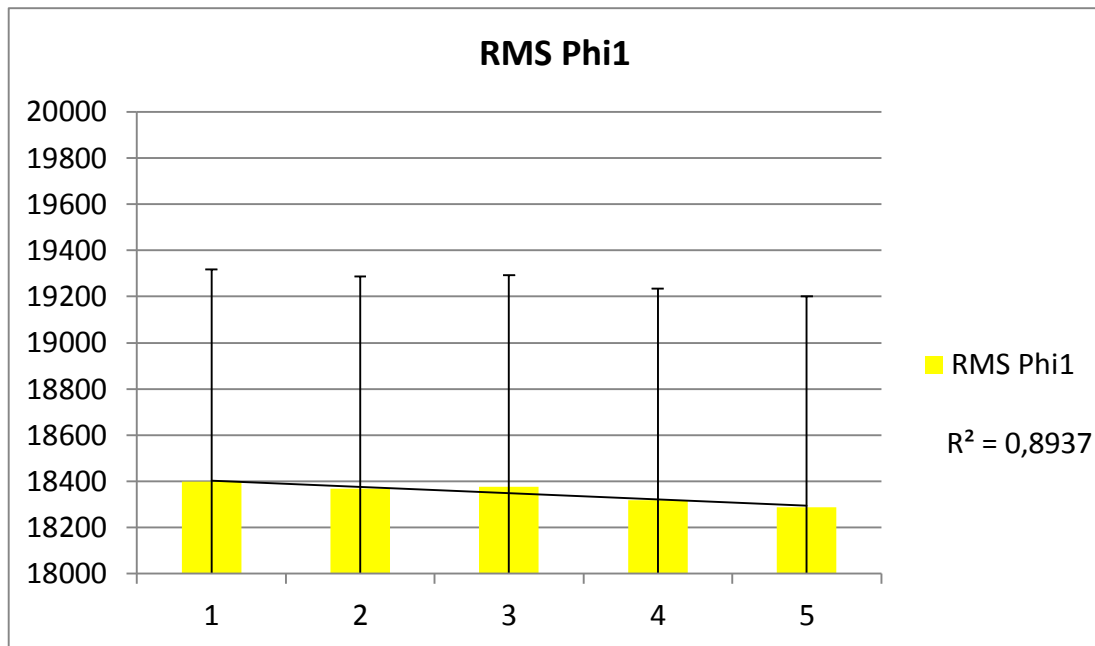


Abbildung 60: rms Phi1 von Messobjekt Grafit

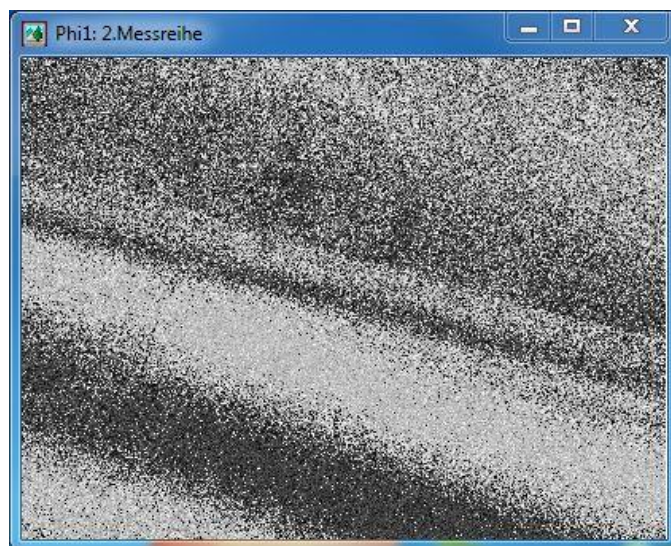
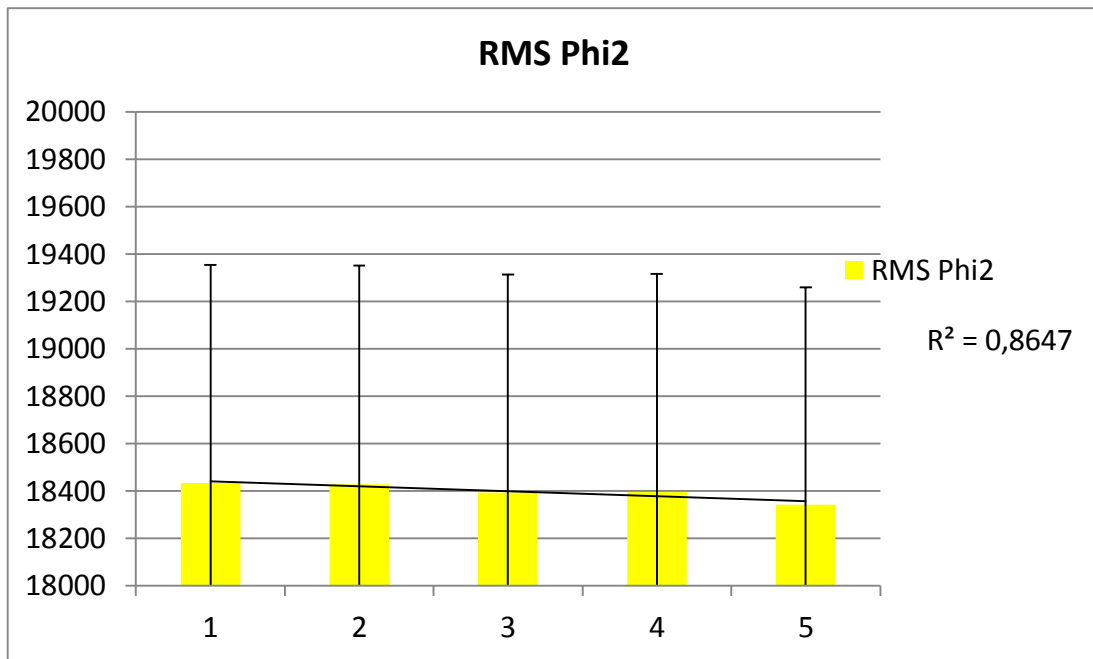
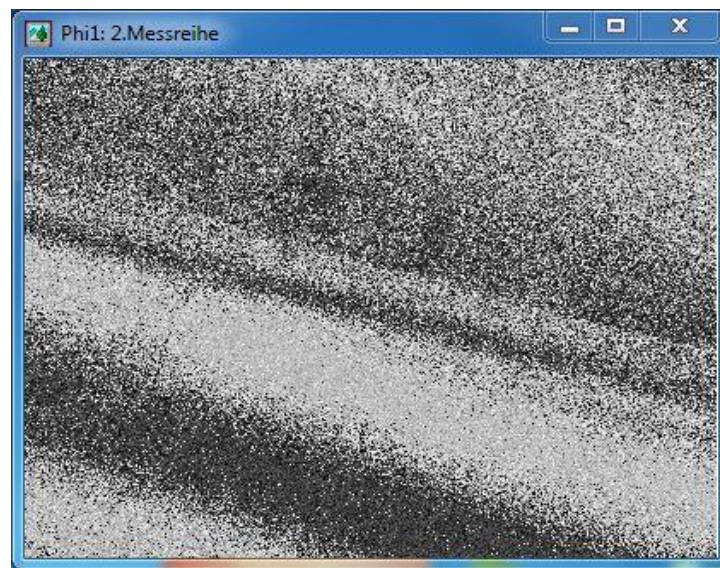


Abbildung 61: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Grafit



**Abbildung 62: rms Phi2 von Messobjekt Grafit**



**Abbildung 63: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Grafit**

Hier ist die Varianz sehr hoch (jeweils fast 0,9), also ist diese Oberfläche nicht geeignet, um mit dem Deflektometer gemessen zu werden.

## 6. Messobjekt: Metallsphäre mit Delle



Abbildung 64: Metallsphäre mit Delle

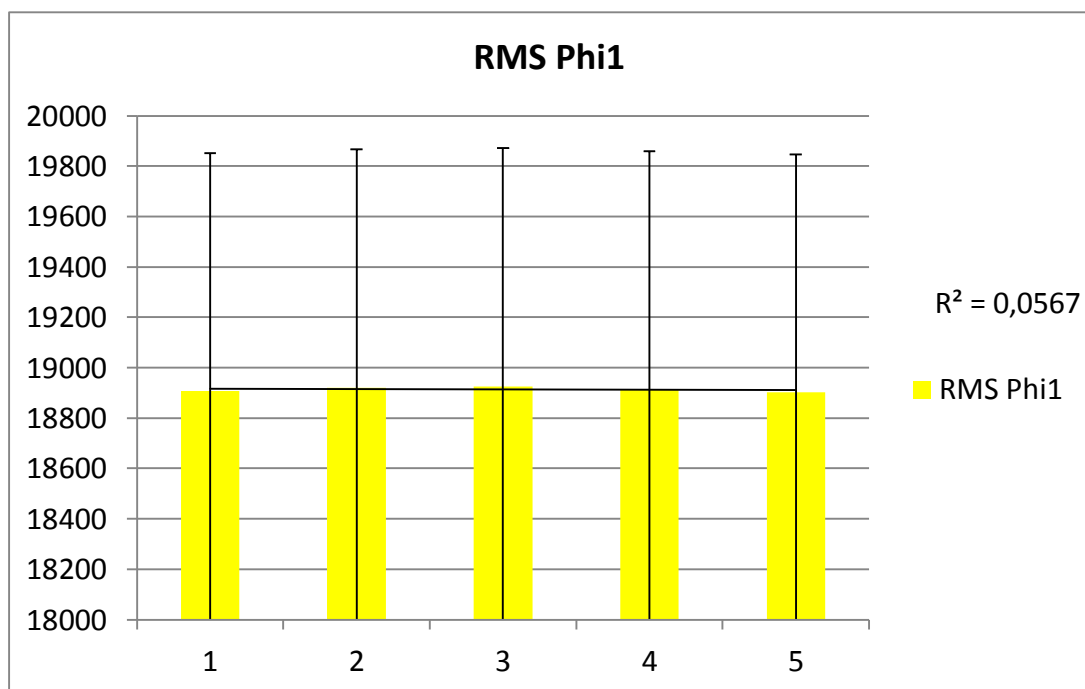


Abbildung 65: rms Phi1 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle

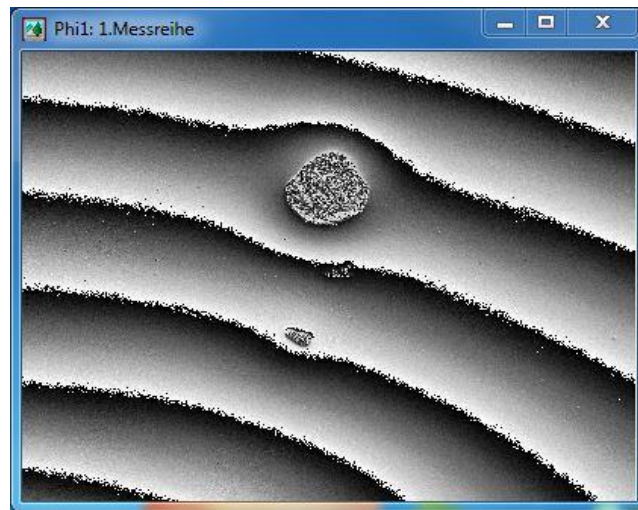


Abbildung 66: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle

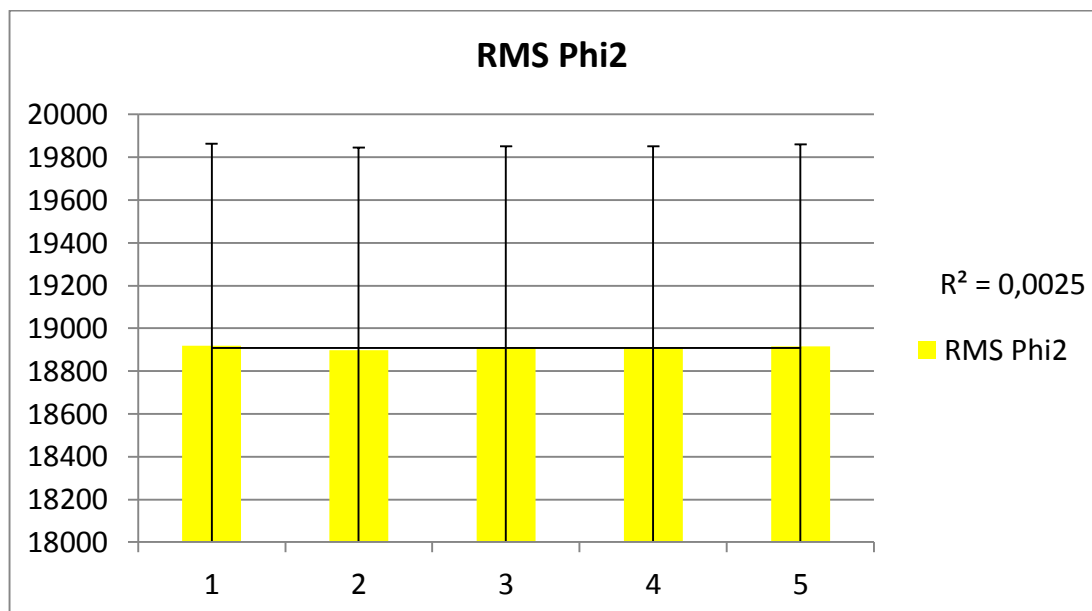
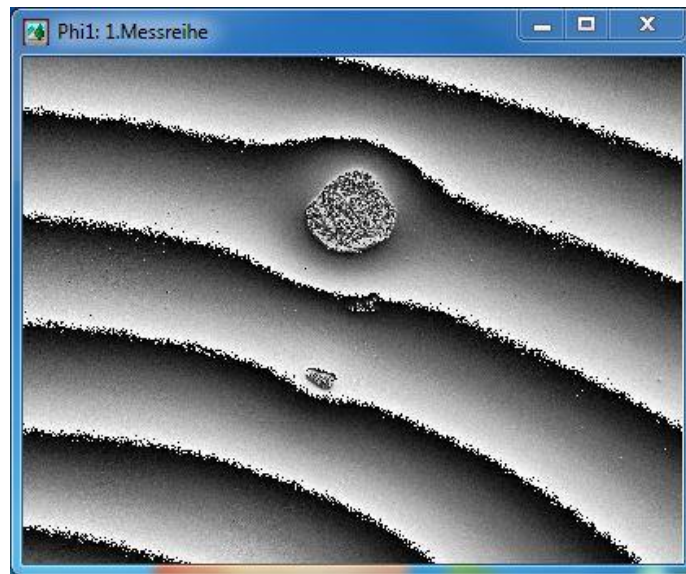


Abbildung 67: rms Phi2 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle





**Abbildung 68: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

Die Metallsphäre liefert die besten Ergebnisse in beiden Steigungsbildern mit der geringsten Varianz. Auch der RMS selber liefert im Vergleich zu den anderen Messungen recht niedrige Werte (unter 19000), also ist diese Oberflächenstruktur am besten geeignet, um mit dem Deflektometer vermessen zu werden.

### **3.2 Wiederholbarkeit**

Um eine Wiederholbarkeit zu erhalten, müssen mehrere Messungen gemacht werden und die Abweichung innerhalb dieser Messreihe ermittelt werden. In 3.1.4 wurden die dazu geeigneten Oberflächen herausgefunden. Es handelt sich um spiegelnde Metalle, welche gut für die Oberflächenmessung mit Hilfe von Deflektometrie geeignet sind. Es werden zwei Objekte vermessen mit je zwanzig Wiederholungen. Um externe Fehler minimal zu halten, werden die Messungen unmittelbar hintereinander durchgeführt. Eine Messung dauert im Schnitt 3 Sekunden. Anschließend werden die Ergebnisse gespeichert, was etwa eine Minute dauert, dann folgt die nächste Messung unter denselben Bedingungen.

### 3.2.1 Metallsphäre mit Delle



**Abbildung 69: Metallsphäre mit Delle**

Da sich in 3.1.3 gezeigt hat, dass diese Metallsphäre am besten für die Messung am Deflektometer geeignet ist, wird damit die Wiederholbarkeit des Gerätes getestet.

Als nächstes werden die Einstellungen des Tunnels gezeigt.

LED-Tunnel - 14.06.2010

Samples: 5

Perioden: 1 2

Breite: 4 4

Winkel: ☐ 0° ☒ 90° ☐ 45° ☐ -45°

☐ Offset 90°  °

☐ Re ☒ Sin ☐ Säg ☐ Maske

☐ Stern, Zentrum X, Y: 0 0

Drücken von Taste Alt + Taste:  
H|V|D, R|S, Cursortasten, ev. + Shift

Status:  
Per=4, Ph=0°/0°, Hor Sinus

Phase: < > =0 ☐ Clipb. Bild 0

Gamma 1 Lo 5 Hi 255

☐ Getriggert: Bilder pro Phase: 0

☐ Fastscan ☐ Unkorrigiert

Pfad und Dateiname: -> Browse

C:\Daten\Testbilder Projekt SS15\150625\5\

1.Messreihe

Parameter Messung Live

Aufnahme Auswertung Stop

LED-Bilder Beenden

Abbildung 70: Einstellungen LED-Tunnel zu Messungen mit Metallsphäre

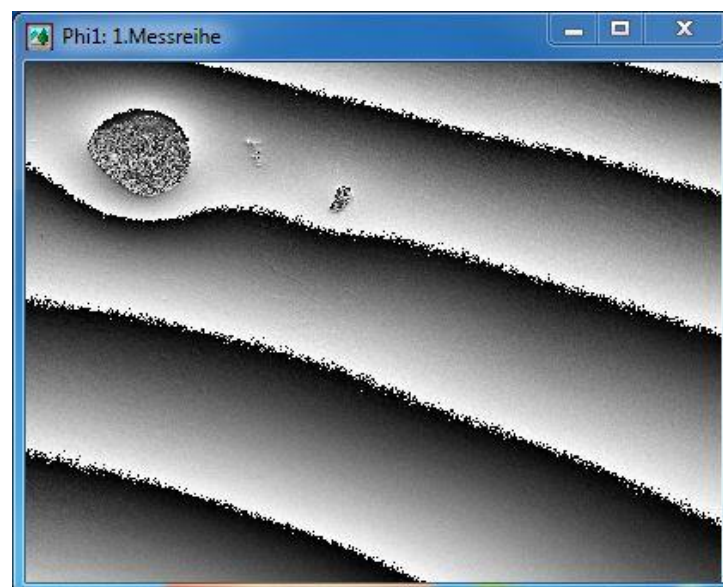
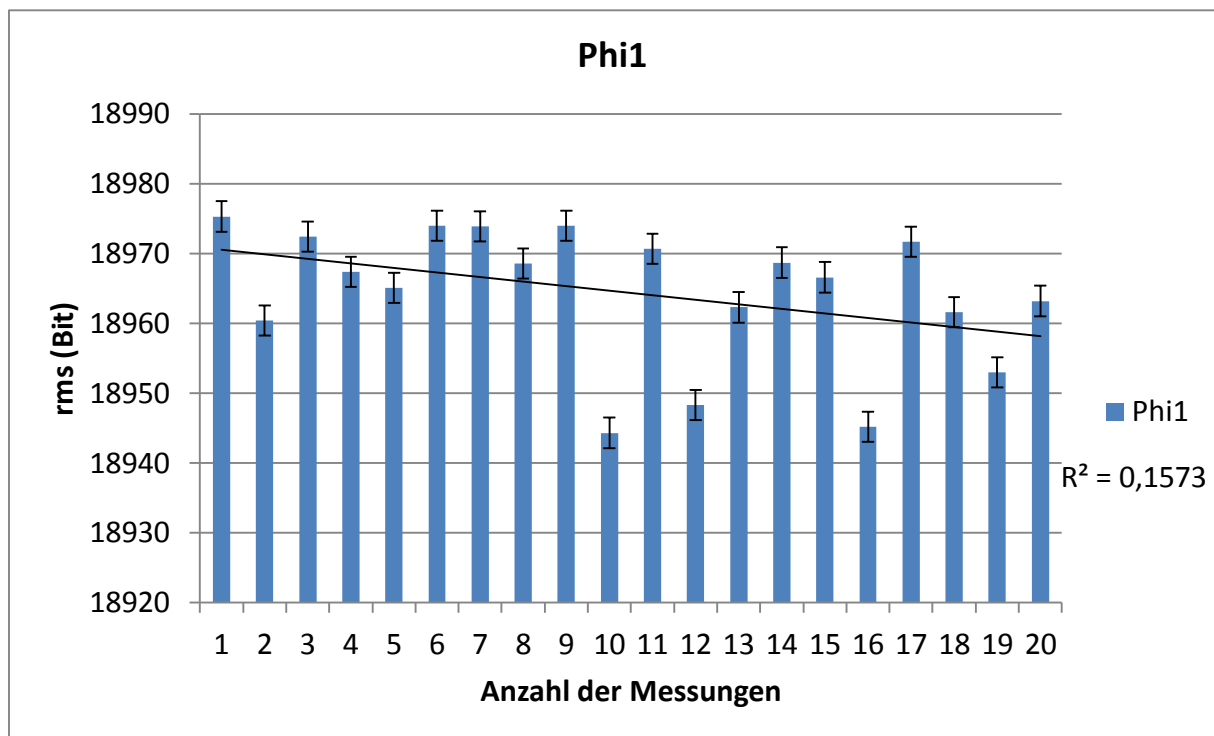


Abbildung 71: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle



**Abbildung 72: rms Phi1 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

Der rms wird zwanzigmal gemessen. Excel zeichnet die Trendlinie hinzu und die kleinen Balken sind der Fehlerindikator mit Standardfehler. Anschließend wird die Varianz der Messungen herausgegeben. Sie beträgt 0,16 bei Phi1 und 0,08 bei Phi2. Beide sind also im Bereich des ALI 201. Wäre die Trendlinie gerade, hätte das Gerät eine sehr gute Wiederholbarkeit, denn es würde jedes mal den selben Wert messen. Man sieht auch bei den Phasenbildern von Phi1 und Phi2 die Krümmung des Streifenmusters bei der Delle.

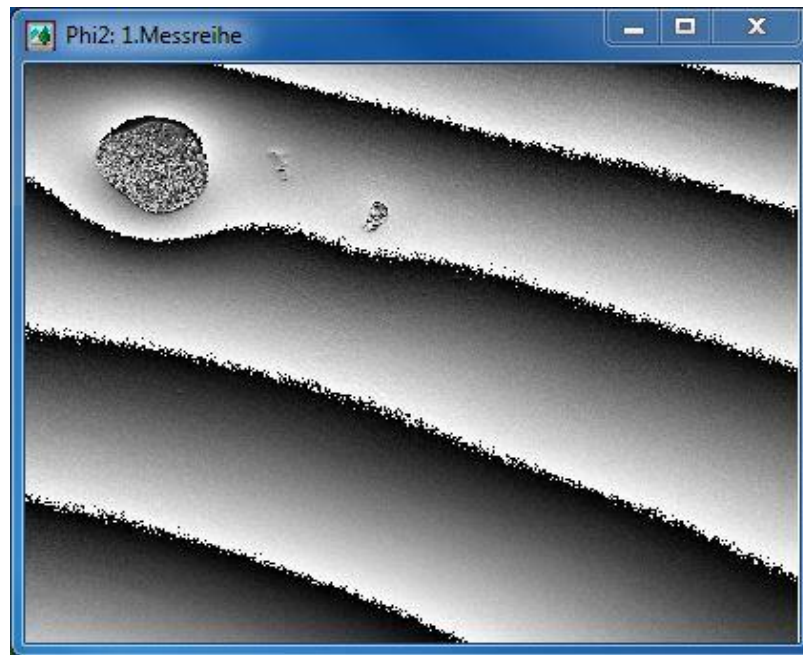


Abbildung 73: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle

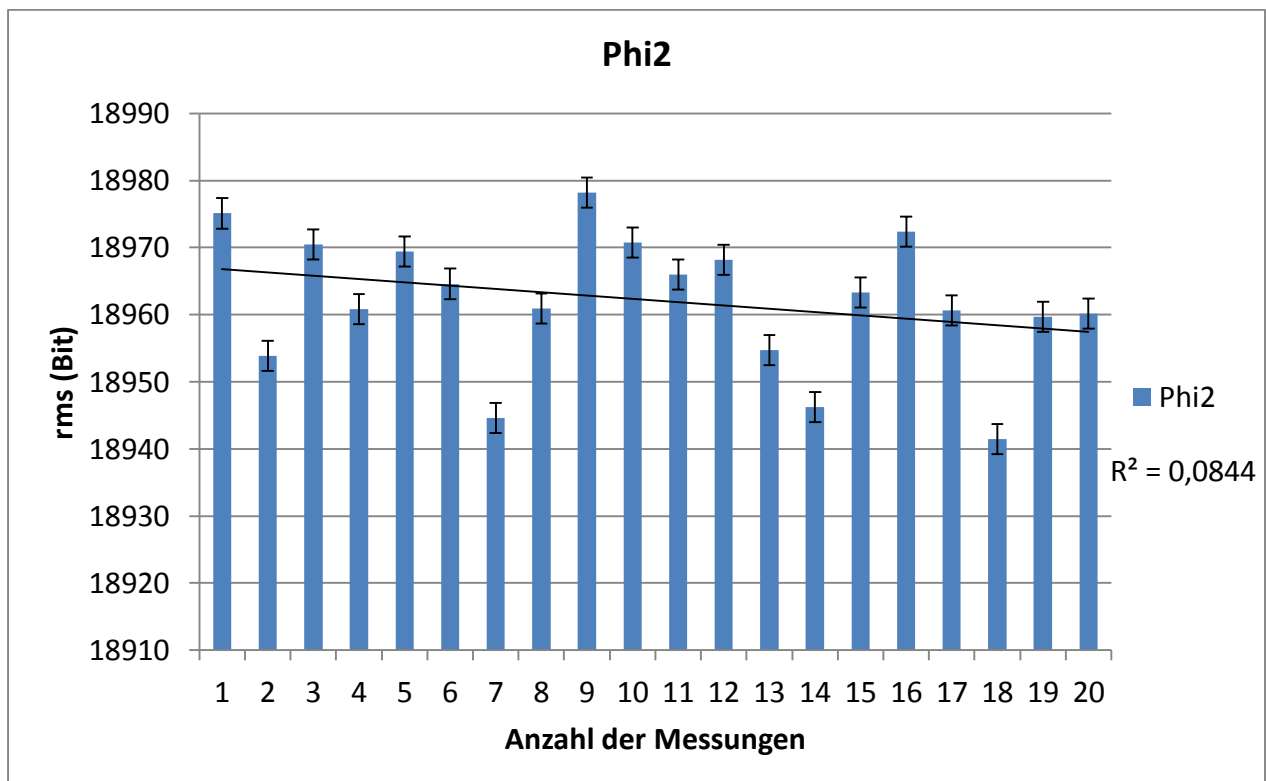
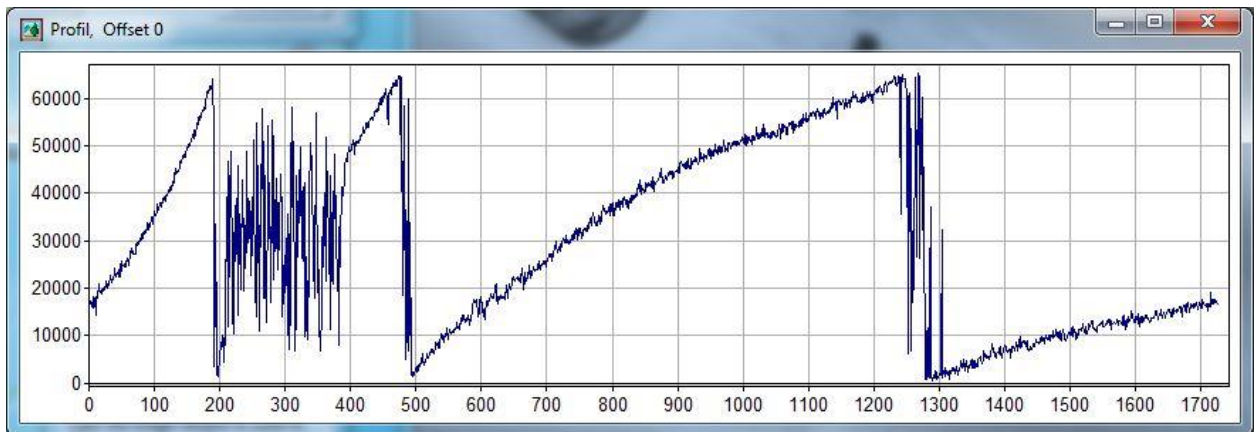
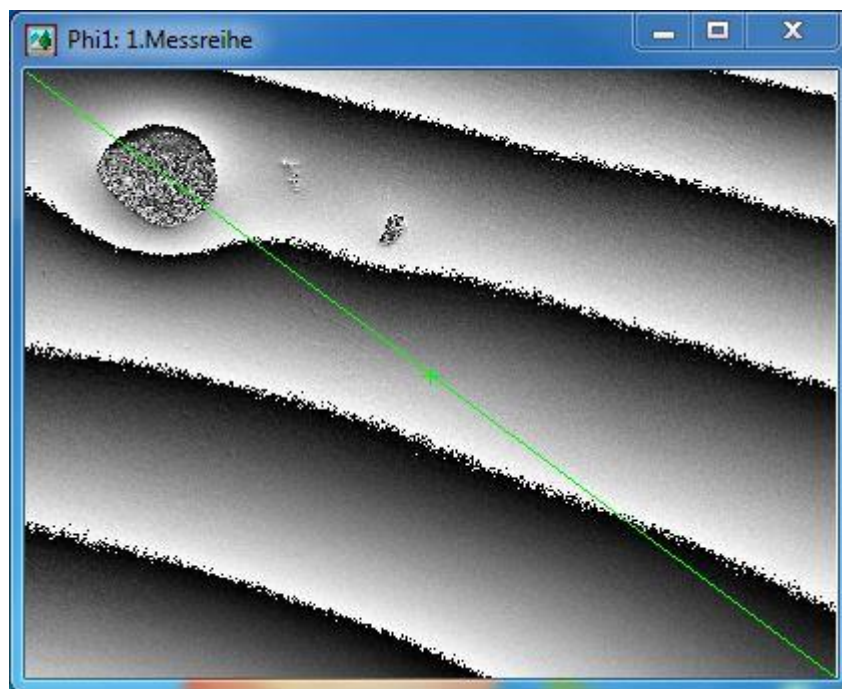


Abbildung 74: rms Phi2 von Messobjekt Metallsphäre mit Delle



**Abbildung 75: Phasenprofil des Messobjekts Metallsphäre mit Delle**



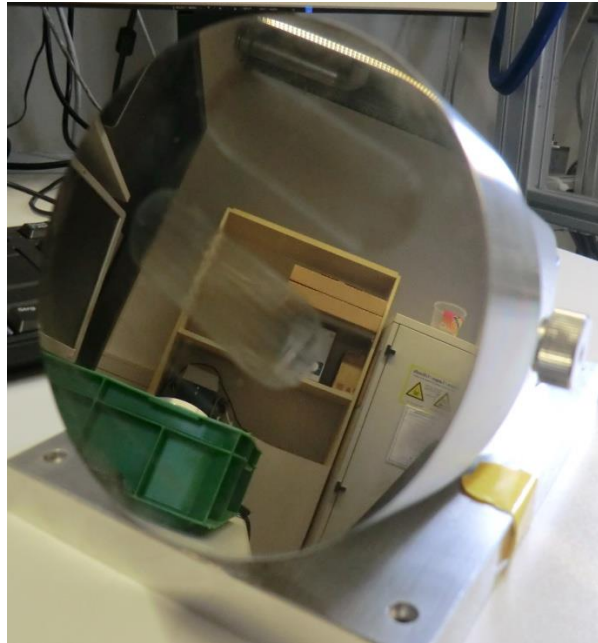
**Abbildung 76: Profilzuordnung zu Abbildung 75**

In diesem Bild (Abbildung 76) sieht man die Markierung (grüne Linie) bei der das Phasenprofil (siehe oberes Bild) gemessen wurde. Man sieht sehr deutlich die Unregelmäßigkeit, also die Delle am Anfang des Musters.



### 3.2.2 Metall mit Polierspur

Da sich gezeigt hat, dass Metall gut für solche Messungen geeignet ist, wurde ein zweites Testobjekt aus Metall vermessen. Dieses Objekt hat eine Polierspur auf seiner Oberfläche (siehe Bild 77)



**Abbildung 77: Metall mit Polierspur**

Auch hier sollen die Einstellungen am Tunnel gezeigt werden:

LED-Tunnel - 14.06.2010

Samples:

Perioden:

Breite:

Winkel: ☐ 0° ☒ 90° ☐ 45° ☐ -45°

☐ Offset 90°  °

☐ Re ☒ Sin ☐ Säg ☐ Maske

☐ Stern, Zentrum X, Y:

Drücken von Taste Alt + Taste:  
H|V|D, R|S, Cursortasten, ev. + Shift

Status:  
Per=2, Ph=0°/0°, Hor Sinus

Phase:  ☐ Clipb.

Gamma  Lo  Hi

☐ Getriggert: Bilder pro Phase:

☐ Fastscan ☐ Unkorrigiert

Pfad und Dateiname:

Abbildung 78: Einstellungen LED-Tunnel zu Messungen mit Metall mit Polierspur



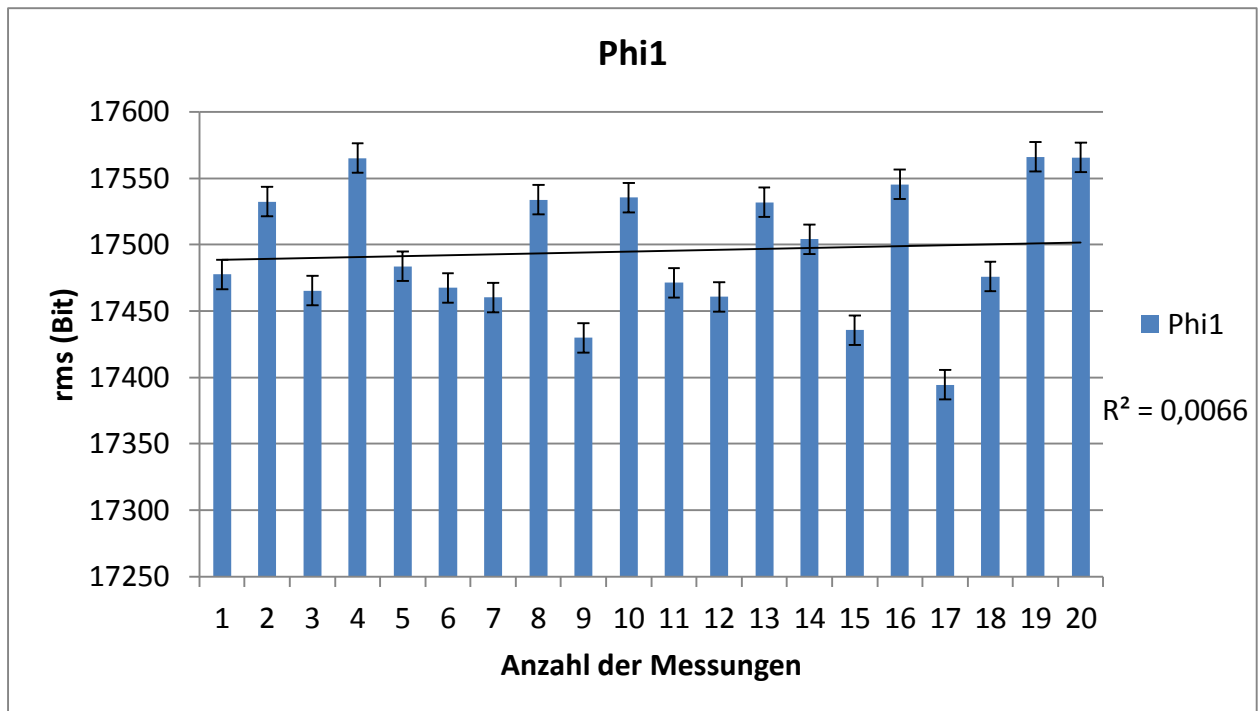


Abbildung 79: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Metall mit Polierspur

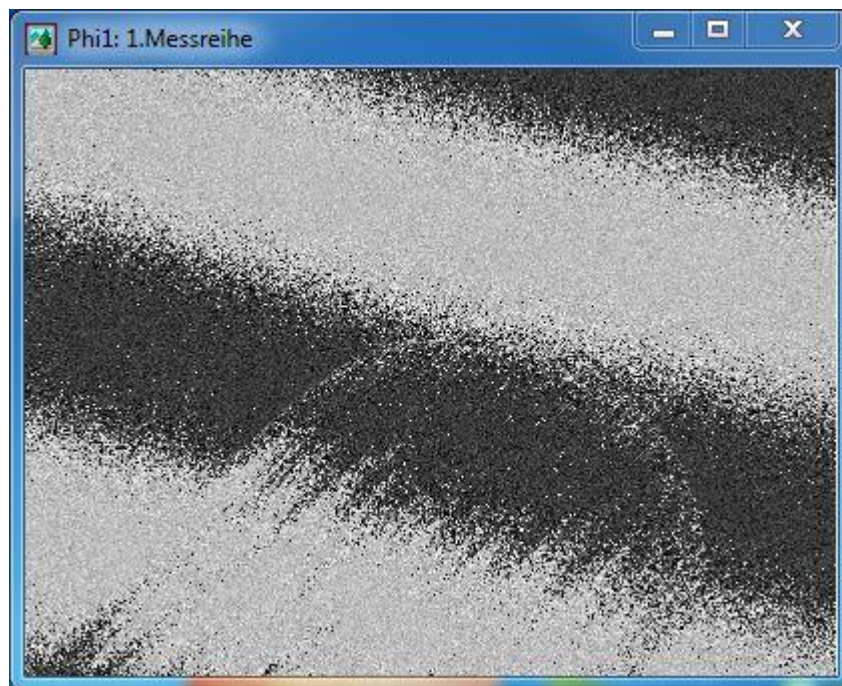


Abbildung 80: rms Phi1 von Messobjekt Metall mit Polierspur

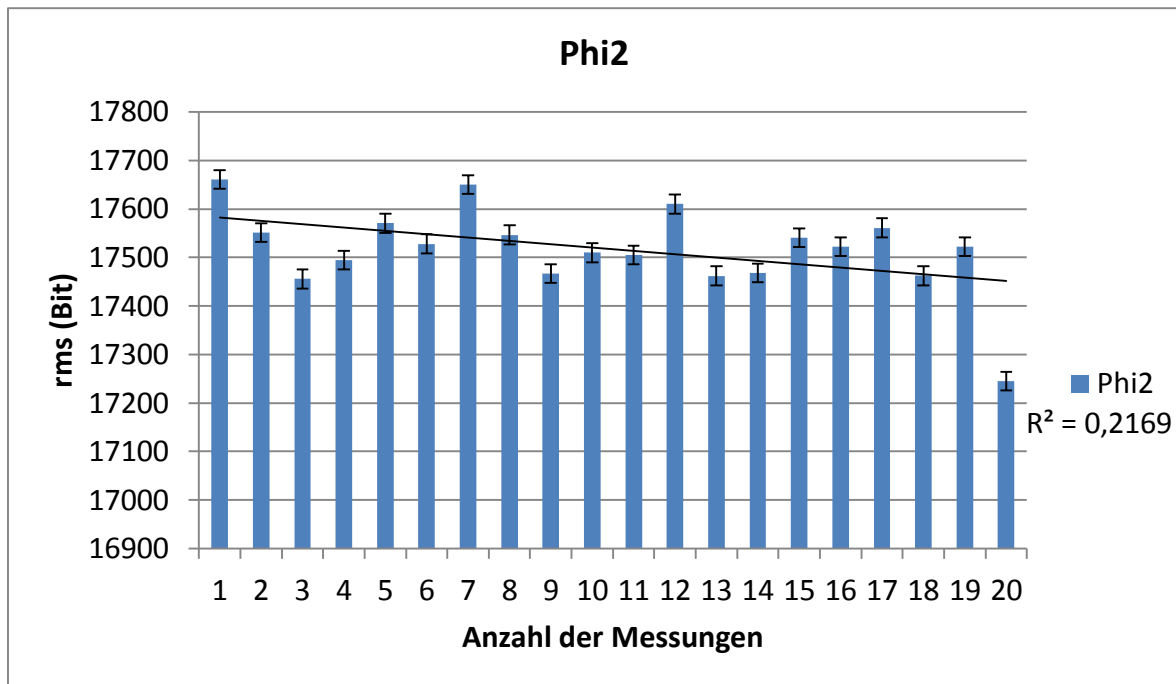


Abbildung 81: Streifenbild Phi2 von Messobjekt Metall mit Polierspur

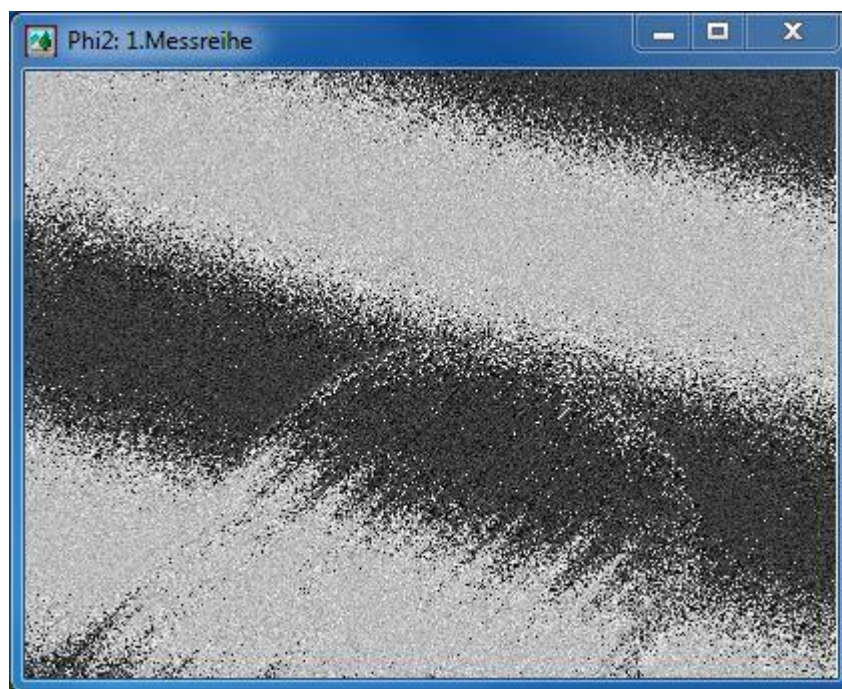
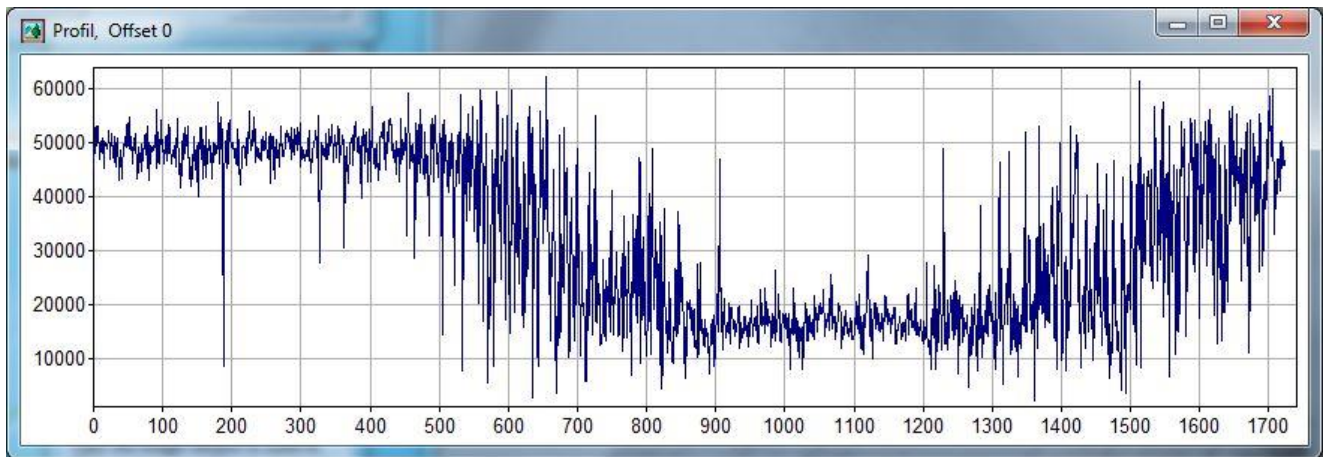


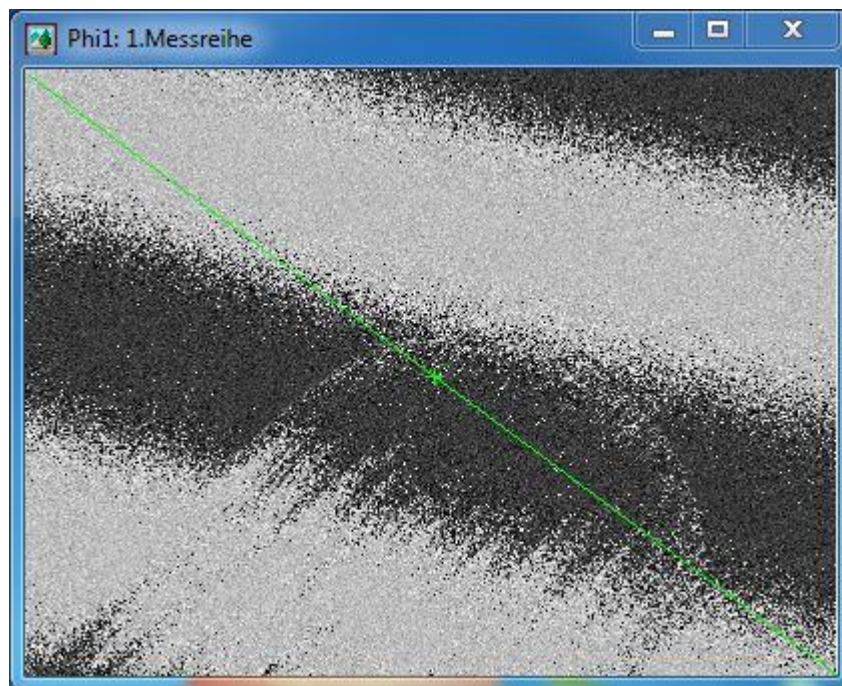
Abbildung 82: rms Phi2 von Messobjekt Metall mit Polierspur

Auch hier wird die selbe Messreihe wie bei dem anderen Metallobjekt durchgeführt.

Hier sieht man, dass bei Phi1 ( $R^2=0,007$ ) die Varianz geringer ist, als bei Phi2 ( $R^2=0,2$ ). Dies ist durch die Polierspur zu erklären, die mit Phi1 besser zu messen ist, als mit Phi2.



**Abbildung 83: Phasenprofil des Messobjekts Metall mit Polierspur**



**Abbildung 84: Profilzuordnung zu Abbildung 83**

Bei diesem Phasenprofil (siehe Bild 83) ist deutlich die Polierspur des Metalls zu erkennen.

## 4 Diskussion

In dieser Arbeit wurde eine Anleitung zum selbstständigen Messen mit dem deflektometrischen Messaufbau erstellt. Um den Aufbau selbst besser zu verstehen und einen Überblick darüber zu erlangen, was mit diesen Messungen möglich ist, wurde weiterhin das Messprinzip erläutert.

Es wurde durch die Vermessung von unterschiedlichen Oberflächen nachgewiesen, dass Oberflächen mit doppelten Reflexen, zum Beispiel plane Glasplatten, für den bestehenden Aufbau und dessen Auswertungsmethodik ungeeignet sind. Außerdem wurde festgestellt, dass stark spiegelnde, freigeformte Metalloberflächen mit Defekten sehr gut vermessen auf diese Weise vermessen werden können (siehe 3.1).

Gut heißt in diesem Sinne, dass die Ergebnisse vergleichbare Standardabweichungen des rms bei wiederholten Messungen (Anzahl 20) ergeben, wie ein etabliertes Messverfahren am Interferometer ALI 201 (siehe 3.2).

Zur dreidimensionalen Vermessung von Testobjekten fehlen noch einige Schritte bei diesem Gerät. Unter dem Punkt 6. Ausblick wird erläutert, welche Maßnahmen getroffen werden müssen, um dieses Gerät soweit bringen zu können.

## **5 Schlussfolgerung**

Die Deflektometrie wird die Interferometrie nicht ersetzen, aber ergänzen. Denn bei spiegelnden Oberflächen, wie zum Beispiel glänzendes Metall ist Deflektometrie für die Oberflächenvermessung gut geeignet. Jedoch für beispielsweise Glas ist die Interferometrie weiterhin führend.

## 6 Ausblick

Schließlich lässt sich sagen, dass mit diesem verwendeten Deflektometer Länge und Breite eines Defekts messbar sind. Die Defekt- oder Kratzertiefe ist abhängig von der Neigung, dem Arbeits-/ und Schirmabstand, der Verzerrung und vielen weiteren Faktoren.

Eine Kalibrierung könnte wie folgt aussehen: es wird eine plane Platte vermessen, von welcher man weiß, dass diese wirklich plan ist, und diesen Wert als Art Nullwert für nachfolgende Messungen verwenden.

Des Weiteren liefert das verwendete Deflektometer Ergebnisse in Bit. Bit ist eine aus der Informatik stammende Einheit. Hier liefert das Deflektometer Ergebnisse, welche in  $2^8$  BIT dargestellt werden. Um diese besser mit anderen vergleichen zu können, ist es notwendig Ergebnisse in der Maßeinheit von Meter beziehungsweise Mikrometer zu erhalten. Man bräuchte also einen Normkratzer. Hier ist gemeint, dass eine Oberfläche einen bereits bekannten Defekt aufweist. So kann man dann mit den gemessenen Daten auf andere unbekannte Defekte schließen.

Außerdem würde eine weitere Kamera benötigt, da man mit nur einer Kamera keine räumliche Tiefe messen kann. Man hat mit einer Kamera ein sogenanntes Rekonstruktionsproblem: das heißt man weiß hier nicht wo genau das Signal herkommt, da es mehrere Ursprungsebenen haben kann. Zur Regulierung dieses Problems kann man die Stereodeflektometrie wählen [2]. „Vergleichbar ist das Messen mit zwei Kameras mit dem Stereosehen beim Menschen“, da dieser mit einem Auge Abstände ebenfalls nicht so gut einschätzen kann [7]. Auch auf die Auflösung der Kamera ist zu achten, da diese zum Teil sehr begrenzt ist.



## Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer IOSB, „Deflektometrie: Automatische Sichtprüfung spiegeln der Oberflächen,“ [Online]. Available: <http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/4698/>. [Zugriff am 30 Juli 2015]
- [2] H. Rapp/ C. Stiller, „Deflektometrische Methoden zur Sichtprüfung und 3D- Vermessung vollreflektierender Freiformflächen,“ [Online]. Available: [http://sirver.net/media/pubs/rapp\\_DeflMethodenZurVermessung\\_FBV2010.pdf](http://sirver.net/media/pubs/rapp_DeflMethodenZurVermessung_FBV2010.pdf). [Zugriff am 30 Juli 2015]
- [3] Christian Franzki, „Mathematik-Wissen,“ [Online]. Available: [http://www.mathematik-wissen.de/sinus\\_clip\\_image002.jpg](http://www.mathematik-wissen.de/sinus_clip_image002.jpg). [Zugriff am 3 August 2015]
- [4] Liftin, G. (2005, 3.Auflage). *Technische Optik in der Praxis*. Göttingen: Springer Verlag.
- [5] Balzar, J. (2008). Regularisierung des Deflektometerproblems - Grundlagen und Anwendung-. *Disertation*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- [6] Rahiman, M. F. (2013). Setup and Calibration of a Fizeau Interferometer and a Deflectometer. *Masterthesis*. Aalen.
- [7] Zitat Prof. Dr. Ulrike Paffrath, Gespräch am 14. Juli 2015

---

# Abbildungsverzeichnis

**Abbildung 1: Messgerät ALI 201**

**Abbildung 2: Überblick Messaufbau LED-Tunnel**

**Abbildung 3: Positionierung des Messobjekts im LED-Tunnel**

**Abbildung 4: Screenshot vom Desktop - Für die Bedienung notwendigen Anwendungen**

**Abbildung 5: Fenster 1 - Oberfläche zur Steuerung des LED Tunnels**

**Abbildung 6: Fenster 2 - Anzeige der durch die Bedienoberfläche generierten Streifenmuster zur Vorabansicht/Kontrolle**

**Abbildung 7: Darstellung der Sinus Funktion zur Veranschaulichung der "Samples" Einstellungen, [3]**

**Abbildung 8: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 9**

**Abbildung 9: Beispiel Streifenmuster - grobe gerade Linien**

**Abbildung 10: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 11**

**Abbildung 11: Beispiel Streifenmuster - feine gerade Linien**

**Abbildung 12: LED-Tunnel Einstellungen zu Abbildung 13**

**Abbildung 13: Beispiel Streifenmuster – breite Streifen**

**Abbildung 14: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 15**

**Abbildung 15: Beispiel Streifenmuster – breite Streifen in 90 Grad**

**Abbildung 16: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 17**

**Abbildung 17: Beispiel Streifenmuster – schmale Streifen in 90 Grad**

**Abbildung 18: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 18**



**Abbildung 19: Beispiel Streifenmuster – Offset 0 Grad**

**Abbildung 20: Einstellungen LED-Tunnel zu Abbildung 21**

**Abbildung 21: Beispiel Streifenmuster – Offset 90 Grad**

**Abbildung 22: Beispiel Streifenmuster – Winkel 45 Grad**

**Abbildung 23: Vid-App-Verknüpfung**

**Abbildung 24: Surf-Inspect-Viewer**

**Abbildung 25: Parameter-Zuordnung**

**Abbildung 26: Aufbau eines Fizeau-Interferometers**

**Abbildung 27 : Messprozess eines Deflektometers [6]**

**Abbildung 28: Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 29: rms von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 30: Oberflächenprofil von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 31: Profilausschnitt von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung: 32: Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 33: rms von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 34: Profilausschnitt von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 35: Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 36: rms von Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 37: Profilausschnitt von Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 38: Streifenbild auf Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 39: Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 40: rms Phi1 von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 41: Streifenbild Phi1 von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 42: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 43: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Eckig\_Plan\_3**

**Abbildung 44: Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 45: rms  $\Phi_1$  von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 46: Streifenbild  $\Phi_1$  von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 47: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 48: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Eckig\_Plan\_6**

**Abbildung 49: Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 50: rms  $\Phi_1$  von Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 51: Streifenbild  $\Phi_1$  von Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 52: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 53: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Rund\_Plan\_2**

**Abbildung 54: Messobjekt Quarzglas**

**Abbildung 55: rms  $\Phi_1$  von Messobjekt Quarzglas**

**Abbildung 56: Streifenbild  $\Phi_1$  von Messobjekt Quarzglas**

**Abbildung 57: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Quarzglas**

**Abbildung 58: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Quarzglas**

**Abbildung 59: Messobjekt Grafit**

**Abbildung 60: rms  $\Phi_1$  von Messobjekt Grafit**

**Abbildung 61: Streifenbild  $\Phi_1$  von Messobjekt Grafit**

**Abbildung 62: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Grafit**

**Abbildung 63: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Grafit**

**Abbildung 64: Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 65: rms  $\Phi_1$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 66: Streifenbild  $\Phi_1$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 67: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 68: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 69: Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 70: Einstellungen LED-Tunnel zu Messungen mit Metallsphäre**

**Abbildung 71: Streifenbild  $\Phi_1$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 72: rms  $\Phi_1$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 73: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 74: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 75: Phasenprofil des Messobjekts Metallsphäre mit Delle**

**Abbildung 76: Profilzuordnung zu Abbildung 75**

**Abbildung 77: Metall mit Polierspur**

**Abbildung 78: Einstellungen LED-Tunnel zu Messungen mit Metall mit Polierspur**

**Abbildung 79: Streifenbild  $\Phi_1$  von Messobjekt Metall mit Polierspur**

**Abbildung 80: rms  $\Phi_1$  von Messobjekt Metall mit Polierspur**

**Abbildung 81: Streifenbild  $\Phi_2$  von Messobjekt Metall mit Polierspur**

**Abbildung 82: rms  $\Phi_2$  von Messobjekt Metall mit Polierspur**

**Abbildung 83: Phasenprofil des Messobjekts Metall mit Polierspur**

**Abbildung 84: Profilzuordnung zu Abbildung 83**

## Anhang

### Zu 1.4.3 LED-Tunnel App g) Weiter Funktionen:

Die Auswahlmöglichkeiten **Re**, **Sin**, **Säg** stehen für die jeweilige Funktion, welche für die Projektion der Streifen verantwortlich ist.

**Re** = Rechteckfunktion

**Sin** = Sinusfunktion

**Säg** = Sägezahnfunktion

Jede Funktion benötigt eine andere Transformation, um die benötigte Oberflächeninformation aus der Reflektion zu berechnen. Daher sollte man es hier bei der Einstellung **Sin** belassen!

Den Haken bei **Maske** sollte man auch beibehalten. Das Entfernen des Hakens hat nur ein größeres Streifenbild an den Rändern zur Folge, das nur bei der Vermessung von sehr großen Objekten benötigt wird.

Bei der Aktivierung des **Sterns** wird statt des Streifenmusters ein Stern projiziert und man kann das Zentrum in X- und Y-Richtung wählen. Dieses Projektionsmuster dient dazu, ein Sinusmuster in einem Kolben zu bekommen.

Mit **Clipboard** und dem Button Live wird das ausgewählte **Bild** auf dem Clipboard dargestellt:



Mit dem Stop Button beendet man dies.

**Getriggert** und **Fastscan** gehören zusammen und sollen NICHT aktiviert werden! Fastscan bedeutet es scant nur über die Achse, das Testobjekt fährt also durch, diese Funktion ist bei unserer Ausführung nicht möglich.

Der Haken bei **Unkorrigiert** soll nicht gesetzt werden. Dieses Tool dient genauso wie Getriggert und Fastscan der Tunnelkalibrierung

Mit **Browse** kann ein bereits aufgenommenes Bild geladen werden.

Bei **Pfad** wird der Speicherpfad in das erste Kästchen und in das zweite Kästchen der **Dateiname** eingegeben.

Bei einem Klick auf **Paramater** öffnet sich dieses Fenster:



Hier kann man genau alle Parameter der Messung einsehen.

Der Button **Messung** wird NICHT betätigt.

**Live** heißt, dass das Muster mit den verschiedenen Einstellungen durchläuft, ohne zu messen. Dies ist zu sehen im Live-Bild der Vid-App.

**Aufnahme** bedeutet in diesem Fall so viel wie Messung starten. Um die Ergebnisse anzuzeigen, muss auf Anzeigen im Surf-Inspect Viewer geklickt werden.

**Auswertung** heißt nicht Auswertung, sondern man springt in die Surf-Inspect-Viewer-App.

**Stop** bedeutet Stop der Live-Aufnahme.

Mit einem Klick auf **LED-Bilder** öffnet sich dieses Fenster:



Hier kann die genaue Position der LEDs festgestellt werden und gespeicherte Streifenmuster geladen werden.

Außerdem kann man mit diesem LED-Bilder Button die Messelstein-Messung durchführen. Hier kann man sehen, woher genau das Licht vom LED-Tunnel an einem bestimmten Punkt auf dem Testobjekt kommt. Außerdem sieht man die Streuung des Lichts, ob das Objekt ein Glanzreflex hat und wohin das Licht in Defekten streut. Um diese Messung zu starten, stellt man zuerst die Helligkeit mit Hilfe der Intensität ein, wobei 1 für 100% steht. Dann sollte das Licht im Raum auf ein Minimum reduziert werden, dann kann man mit dem Aufnahme-Button beginnen. Sobald die Messung beendet ist, klickt man auf Einlesen. Jetzt kann man ein Bild anklicken und die x und y Position der LEDs variieren.

Außerdem kann man die Bilder in ImageJ (freie Software) exportieren, um dort zu schauen, wie viele Knoten gebraucht werden, das heißt wie breit die Streifen bei diesem Objekt sein müssen. Der 3-D plot des Phi1 Bildes (siehe Surf Inspect-Viewer) wird hierfür verwendet. Man beurteilt bei etwa 20% der Höhe des Bildes, wie viele Knoten verwendet werden.

Mit einem Klick auf **Beenden** wird diese App beendet.

#### Zu 1.4.6 Surf Inspect Viewer e) Weitere Funktionen:

**Precalc** öffnet bereits gemessene Dateien. Hier kann dann auch eine Vorkalkulation mit den Werten gemacht werden.

Mit **Szene** kann man mehrere Aufnahmen bei gleicher Sample-Zahl machen.

**AOI**, **Marker**, **Gemeinsam** und **R** sind für die Auswertung nicht relevant.

Bei **Anzeigen** werden die Messungen im Bilder-Set anzeigen.

**Anordnen** dient dazu, dass man die Original-Anordnung der Bilder wieder erlangt, wenn man beispielsweise ein Bild vergrößert hat.

Mit **Farbe** können Falschfarben auf ein Bild gelegt werden.

Der **Kontrast** kann beim gleichnamigen Button eingestellt werden. Es kann ein Minimum unter Low und ein Maximum unter High geregelt werden. Man kann auch die Einstellung automatisch oder Sinus durch ein Häkchen anwählen. Mit einem Häkchen bei Sinus und einer Zahl, rechnet das Programm diesen unterteilten Sinus über das Bild. Automatisch ist nur eine visuelle Grauwertanpassung. Beim Originalbild ist nur die Sinus, nicht aber die Automatik Funktion möglich, da dieses Bild nur 8 Bit hat.

**Tilt+Roll** öffnet ein neues Fenster. Hier kann der Offset (Offs) die Neigung in X-Richtung (Tilt X) und die Neigung in Y-Richtung (Tilt Y) eingestellt werden. Dies gilt nur für das Phasenbild. Man kann also nachträglich das Phasenbild durchschieben, um Defekte und die Krümmung der Streifen besser zu erkennen. Rücksetzen bedeutet, alles ist wieder so wie es gemessen wurde.

Mit **Filter** kann man nachträglich verschiedene optische Filter über ein gemachtes Bild legen. Vergleichbar mit Photoshop. Zum Beispiel rechnet der Filter Lowpass in beide Richtungen die gleiche Zahl. Unwrap als Filter bedeutet, dass es ohne Phasensprung ist.

Mit **Schließen** wird die Anwendung geschlossen.